

Universidade Federal do Rio de Janeiro

ANÁLISE DA PARTIDA DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO PELO MÉTODO
DOS ELEMENTOS FINITOS

Fábio Rosan Gonçalves

2012



**Universidade Federal
do Rio de Janeiro**

Escola Politécnica

ANÁLISE DA PARTIDA DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Fábio Rosan Gonçalves

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Rio de Janeiro
Setembro de 2012

ANÁLISE DA PARTIDA DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO PELO MÉTODO
DOS ELEMENTOS FINITOS

Fábio Rosan Gonçalves

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.

Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.

Prof. Alexandre Coelho, M.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
SETEMBRO de 2012

Gonçalves, Fábio Rosan

Análise da Partida do Motor de Indução Trifásico pelo Método dos Elementos Finitos/ Fábio Rosan Gonçalves. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2012.

XIII, 69 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/Curso de Engenharia Elétrica, 2012.

Referencias Bibliográficas: p. 70.

1. Partida Motor de Indução Trifásico 2. Partida com tensão reduzida. 3. Distribuição de Corrente nas barras do rotor. 4. Característica Conjugado x Velocidade I. Ferreira, Antônio Carlos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Elétrica. III. Título.

*“No final, tudo dá certo.
Se não deu, ainda não
chegou ao fim.”*

Fernando Sabino

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais Marlene e Roberto. Sem eles, jamais chegaria até aqui e sou eternamente grato por todo empenho que tiveram para que não faltasse apoio, educação, e principalmente carinho. Certamente são meus ídolos.

Agradeço à minha namorada Gilciana por sempre me apoiar e motivar a todos os instantes durante esta jornada, em cada dia de estudo, cada trabalho, e pelo carinho de sempre.

Agradeço ao meu orientador Antônio Carlos Ferreira, pela total dedicação a cada etapa deste projeto para me ajudar, explicar e orientar, sempre apontando os erros cometidos de forma exemplar, respeitando o abismo de conhecimento entre mestre e aluno.

Deixo também meu agradecimento aos professores Sebastião Ércules Melo de Oliveira e Alexandre Coelho por se prontificarem a participar da banca e contribuírem de forma muito respeitosa para meu aprendizado.

Agradeço aos meus grandes amigos João Napoli e Felipe Albino por terem participado de todos os obstáculos vencidos ao longo dos anos de faculdade. Sem dúvida se tornaram menos difíceis com amigos ao lado.

Ao coordenador do curso de Engenharia Elétrica e também aos funcionários da secretaria Kátia e Oswaldo por estarem sempre dispostos a ajudar os alunos. Perdi a conta de quantas foram as vezes que bastou falar com eles para resolver um problema.

Por fim, à todos que contribuíram para a minha formação de forma direta ou indireta.

Muito obrigado.

Resumo

O presente trabalho visa mostrar diferentes comportamentos na partida do motor trifásico alterando a geometria das ranhuras de rotor e tensão plena, além de técnicas de partida com tensão reduzida. Três modelos de motores são simulados para averiguar seu comportamento em função das ranhuras do rotor, comparando-os com as diferentes classes e suas características. Apenas um modelo é utilizado nas simulações de técnicas de partida com tensão reduzida, tendo seus resultados comparados à partida direta.

É feita uma breve introdução teórica sobre os motores de indução trifásicos, explicando sucintamente seu funcionamento, alguns fenômenos físicos pertinentes às análises, as fórmulas e circuito equivalente. Além disso, são comparadas suas características com as variáveis das fórmulas obtidas a fim de determinar o comportamento esperado. Duas formas de partidas com tensão reduzida são apresentadas e explicadas.

Dois softwares do pacote Ansoft de análise transitória eletromagnética são usados para a simulação das partidas dos motores: RMxpert e Maxwell 2D. Os softwares são apresentados e tem seus parâmetros, configurações e telas de controle explicados, esclarecendo os passos tomados nas simulações. Os resultados obtidos nas simulações são comparados entre si e confrontados com a teoria explicada.

Abstract

The present study aims to show different behaviors in three phase motor starting by changing the geometry of the rotor slots and full voltage, and of reduced voltage starting techniques. Three engine models are simulated to investigate their behavior as a function of the rotor slots, comparing them with different classes and their characteristics. Only one model is used in simulations of reduced voltage starting techniques, and their results are compared to the direct start.

A brief theoretical introduction about three phase induction motors is done, briefly explaining its operation, some physical phenomena relevant to the analyzes, formulas and equivalent circuit. Besides, its characteristics are compared with the formulas's variables obtained to determine the expected behavior. Two types of reduced voltage techniques are presented and explained.

Two softwares of Ansoft's package of electromagnetic transient analysis are used for the starts simulation engines: RMxpert and Maxwell 2D. The softwares are presented and has its parameters, settings and control screens explained, clarifying the steps taken in the simulations. The simulation results are compared and confronted with the theory explained.

Índice

Índice	ix
Lista de figuras	xi
Capítulo 1 - Introdução	1
Capítulo 2 - Motor de Indução Trifásico	3
2.1 - Circuito Equivalente do Motor de Indução	5
2.2 - Relação Conjugado x Velocidade	7
2.3 - Impedância do rotor na relação Conjugado x Velocidade	9
2.4 - Classe dos motores	12
2.4.1 - Classe A:	12
2.4.2 - Classe B:	13
2.4.3 - Classe C:	15
2.4.4 - Classe D:	16
2.5 - Partidas com tensão reduzida	16
2.5.1 - Partida com chave estrela-triângulo	17
2.5.2 - Partida com autotransformador ou chave compensadora	18
Capítulo 3 - Programas usados e suas configurações	20
3.1 - RMxpert	20
3.1.1 - Escolha do exemplo	21
3.1.2 - Parâmetros do estator	23
3.1.3 - Parâmetros do rotor	24
3.1.4 - Parâmetros de Análises	25
3.1.5 - Opções de resultados	27
3.2 - Maxwell – Maxwell 2D	28
3.2.1 - Criando o modelo	28
3.2.2 - Parâmetro “Model”	29
3.2.3 - Parâmetro “Boundaries”	31

3.2.4 - Parâmetro “Excitations”	31
3.2.5 - Parâmetro “Parameters”	32
3.2.6 - Parâmetro Mesh Operations	33
3.2.7 - Parâmetro “Analysis”	33
3.2.8 - Parâmetro “Optimetrics”	34
3.2.9 - “Results”	35
3.2.10 - “Fields Overlay”	35
Capítulo 4 - Simulações e resultados.....	39
4.1 - Resultados RMXprt	39
4.1.1 - Motor 1: Classe A e B.....	40
4.1.2 - Motor 2: Classe D	41
4.1.3 - Motor 3: Classe C	43
4.1.4 - Comparação entre os modelos	44
4.2 - Resultados Maxwell 2D	46
4.2.1 - Motor 1: Classe A e B.....	46
4.2.2 - Motor 2: Classe D	50
4.2.3 - Motor 3: Classe C	54
4.2.4 - Comparação dos resultados	58
4.2.5 - Partida estrela-triângulo.....	60
4.2.6 - Partida com autotransformador.....	63
4.2.7 - Comparação entre as duas partidas	65
Capítulo 5 - Conclusão	68
Referências Bibliográficas	70

Lista de figuras

Figura 1: Campo girante no estator em diferentes instantes (a), (b) e (c).....	3
Figura 2: Circuito equivalente do Motor de Indução trifásico.	5
Figura 3: (a) Campo magnético no rotor com carga leve; (b) Campo magnético no rotor com carga pesada.	8
Figura 4: Característica conjugado-velocidade.	9
Figura 5: Circuito com o equivalente Thevenin.	10
Figura 6: Efeito da variação da resistência do rotor na característica conjugado-velocidade de um motor de indução trifásico.	11
Figura 7: Curvas típicas das classes dos motores de indução.	12
Figura 8: Ranhuras típicas do motor classe A.....	13
Figura 9: Ranhuras típicas do motor classe B.....	13
Figura 10: Fluxo de dispersão na (a) superfície e (b) na base da ranhura do rotor.	14
Figura 11: Esquemático das lâminas imaginárias das barras.....	15
Figura 12: Ranhuras típicas do motor classe C.....	15
Figura 13: Ranhuras típicas do motor classe D.....	16
Figura 14: Circuito trifilar de ligação da chave estrela-triângulo.	17
Figura 15: Circuito trifilar de ligação para partida com autotrafo.	19
Figura 16: Opção para visualização de exemplos.....	21
Figura 17: Seção “Project Manager” destacada.	22
Figura 18: Propriedades da máquina.	22
Figura 19: Parâmetros do estator.....	23
Figura 20: Dimensões da ranhura do estator.	24
Figura 21: Organização dos enrolamentos do estator.....	24
Figura 22: Dimensões das ranhuras: (a) Motor 1 ; (b) Motor 2 ; (c) Motor 3.....	25
Figura 23: Janela de “Add solution setup”.....	26
Figura 24: Opções para início da análise.....	26
Figura 25: Janela de criação de gráfico 2D retangular.....	27
Figura 26: Inserção de um modelo.....	28
Figura 27: Parâmetros de um modelo Maxell 2D.	29
Figura 28: MotionSetup – aba Type.	29
Figura 29: MotionSetup – aba Data.	30
Figura 30: MotionSetup – aba Mechanical.	30
Figura 31: Agrupamento e parâmetros dos enrolamentos.	31

Figura 32: Janela de configuração do Solution Setup – aba General.....	33
Figura 33: Janela de configuração do Solution Setup – aba Save Fields.....	34
Figura 34: Plotagem dos campos.....	36
Figura 35: Configuração do campo escolhido.	36
Figura 36: Seleção do instante a ser visualizado.	37
Figura 37: Linhas de fluxo magnético no estator.....	37
Figura 38: Plotagem da malha do MEF no estator.	38
Figura 39: (a) Vista geral do estator usado nas simulações. (b) Detalhes da ranhura do estator.	39
Figura 40: (a) Vista geral do rotor do primeiro rotor. (b) Detalhes da ranhura do rotor do motor 1.	40
Figura 41: Característica conjugado x velocidade do primeiro motor.	40
Figura 42: Variação da corrente em relação à velocidade – Motor 1.....	41
Figura 43: (a) Vista geral do rotor do segundo motor. (b) Detalhes da ranhura do rotor do motor 2.	41
Figura 44: Característica conjugado x velocidade do segundo motor.	42
Figura 45: Variação da corrente em relação à velocidade – Motor 2.....	42
Figura 46: (a) Vista geral do rotor do terceiro motor. (b) Detalhes da ranhura do rotor do motor 3.	43
Figura 47: Variação da corrente em relação à velocidade – Motor 3.....	43
Figura 48: Variação da corrente em relação à velocidade – Motor 3.....	44
Figura 49: Comparação da característica Conjugado x Velocidade dos três motores. 45	
Figura 50: Comparação da Corrente de Armadura x Velocidade dos três motores.	45
Figura 51: Gráfico Conjugado x velocidade do motor 1.....	46
Figura 52: Gráfico da velocidade no tempo do motor 1.....	47
Figura 53: Gráfico do conjugado pelo tempo do motor 1.....	47
Figura 54: Corrente de armadura da fase A – Motor 1.....	48
Figura 55: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento de 97,67%.	48
Figura 56: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento 19,56%. 49	
Figura 57: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento de 2,03%.	50
Figura 58: Gráfico Conjugado x velocidade do motor 2.....	50
Figura 59: Gráfico da velocidade no tempo do motor 2.....	51
Figura 60: Gráfico do conjugado pelo tempo do motor 2.....	51
Figura 61: Corrente de armadura da fase A – Motor 2.....	52

Figura 62: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento de 92,11%.	52
Figura 63: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento de 16,87%.	53
Figura 64: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento de 6,22%.	54
Figura 65: Gráfico Conjugado x velocidade do motor 3.....	54
Figura 66: Gráfico da velocidade no tempo do motor 3.....	55
Figura 67: Gráfico do conjugado pelo tempo do motor 3.....	55
Figura 68: Corrente de armadura da fase A – Motor 3.	56
Figura 69: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento de 97,00%.	56
Figura 70: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento de 21,46%.	57
Figura 71: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento de 3,01%.	58
Figura 72: Velocidade x tempo dos três motores.	58
Figura 73: Conjugado x tempo dos três motores.....	59
Figura 74: Conjugado x velocidade dos três motores.....	59
Figura 75: Conjugado, velocidade e corrente ao longo do tempo – Partida estrela-triângulo.....	61
Figura 76: Comparação do conjugado entre a partida direta e a partida estrela-triângulo.....	61
Figura 77: Comparação da velocidade entre a partida direta e a partida estrela-triângulo.....	62
Figura 78: Comparação da corrente entre a partida direta e a partida estrela-triângulo.	62
Figura 79: Conjugado, velocidade e corrente ao longo do tempo – Partida com autotrafo.	63
Figura 80: Comparação do conjugado entre a partida direta e a partida com autotrafo.	64
Figura 81: Comparação da velocidade entre a partida direta e a partida com autotrafo.	64
Figura 82: Comparação da corrente entre a partida direta e a partida com autotrafo..	65
Figura 83: Comparação dos conjugados das partidas.	65
Figura 84: Comparação das velocidades das partidas.....	66
Figura 85: Comparação das correntes das partidas.....	66

Capítulo 1 - Introdução

A utilização de motores de indução é cada vez mais comum e crescente, principalmente quando se refere àqueles com rotor tipo gaiola de esquilo, devido a características como robustez, durabilidade e simplicidade na construção. Podendo ser fracionário ou de grande porte, o motor de indução ganha versatilidade em diversos setores: prediais, industriais e até residenciais.

Devido às diversas aplicações do motor de indução, tornaram-se necessárias algumas características de funcionamento específicas para cada atividade, por exemplo: conjugado de partida, corrente de partida, escorregamento e outras. Os aspectos construtivos do motor determinam seu comportamento e parâmetros, os quais devem ser cuidadosamente escolhidos para a finalidade determinada.

Nos motores de potência elevada, a corrente de partida pode ser um problema para as redes de distribuição que os alimenta. Correntes de partida elevadas exigem da indústria uma maior contratação de demanda, o que acarreta um maior custo nos contratos de fornecimento de energia, além de exigir um sistema preparado para tais picos de corrente, evitando afundamentos de tensão. Para contornar este problema, existem diversas técnicas de partida com tensão reduzida, abaixo da nominal, o que consequentemente reduz a corrente de partida na mesma proporção. Entretanto, como o conjugado varia com o quadrado da tensão de alimentação dos enrolamentos, uma tensão menor faz com que o motor parta com um conjugado mais baixo. Um conjugado de partida muito baixo limita o uso do motor para acionar cargas com inércia elevada.

O presente estudo analisa diferentes partidas com tensão plena do motor de indução trifásico, sua relação com as ranhuras do rotor, como variam em função da velocidade. Também são estudados dois tipos de partidas com tensão reduzida, analisando sua diferença com a partida direta. Ao longo do trabalho, são apresentados diferentes resultados de simulações de partidas utilizando softwares do pacote Ansoft de análise transitória eletromagnética.

No capítulo 2, é apresentada uma breve introdução teórica com as principais fórmulas analíticas do motor de indução para regime permanente. Além disso, é mostrado como a densidade de corrente nas barras do rotor se comporta durante transitório, e como a resistência e reatância de dispersão muda durante este período de formas diferentes, dependendo da geometria e medidas das ranhuras do rotor. Ainda neste capítulo, quatro classes de motores são apresentadas, bem como seu

comportamento e características respectivas. Por ultimo, são mostrados dois tipos de partida de motor com tensão reduzida.

Os dois softwares da Ansoft usados para a simulação das características dos motores e suas partidas, são: RMXprt e Maxwell 2D. O primeiro software, o RMXprt, é responsável por executar uma análise do modelo, levantando diversas curvas característica do motor. O software seguinte, o Maxwell 2D, utiliza o Método dos Elementos Finitos para calcular as distribuições de corrente e campos eletromagnéticos dos modelos. Três modelos de motores foram usados para as simulações de partida à tensão plena. Cada um deles tiveram suas ranhuras modeladas de forma a ter características semelhantes às classes apresentadas no capítulo 2 e foram simulados em ambos os softwares. Um dos modelos foi escolhido e simulado no Maxwell 2D usando partidas com tensão reduzida.

No terceiro capítulo os softwares usados são apresentados, mostrando suas principais características, funções e configurações. O capítulo é dividido em seções de acordo com o software e seus respectivos parâmetros. Os passos usados para a escolha do exemplo de motor do próprio software usado e as modificações feitas no mesmo são detalhados.

Os resultados das simulações são apresentados no capítulo 4. Cada um dos modelos tem seus resultados analisados e posteriormente comparados entre si. As simulações de partida com tensão plena com diferentes ranhuras do rotor são comparadas com a teoria explicada no segundo capítulo, confrontando-as com suas respectivas classes e características. As simulações de partidas com tensão reduzida tem seus resultados comparados com uma partida direta do mesmo motor.

Capítulo 2 - Motor de Indução Trifásico

O motor de indução trifásico é composto de duas partes principais. A parte fixa, o estator, contém os enrolamentos de armadura, os quais são alimentados por corrente alternada. A parte móvel, o rotor, contém as barras (rotor gaiola de esquilo) ou enrolamentos (rotor bobinado) que terão uma corrente induzida pelo campo girante gerado pela armadura. Devido ao objetivo do presente trabalho, o rotor considerado nos textos a seguir, será do tipo gaiola.

O campo girante é uma associação dos campos gerados pelos enrolamentos da armadura. Na figura 1, é possível observar este fenômeno com clareza.

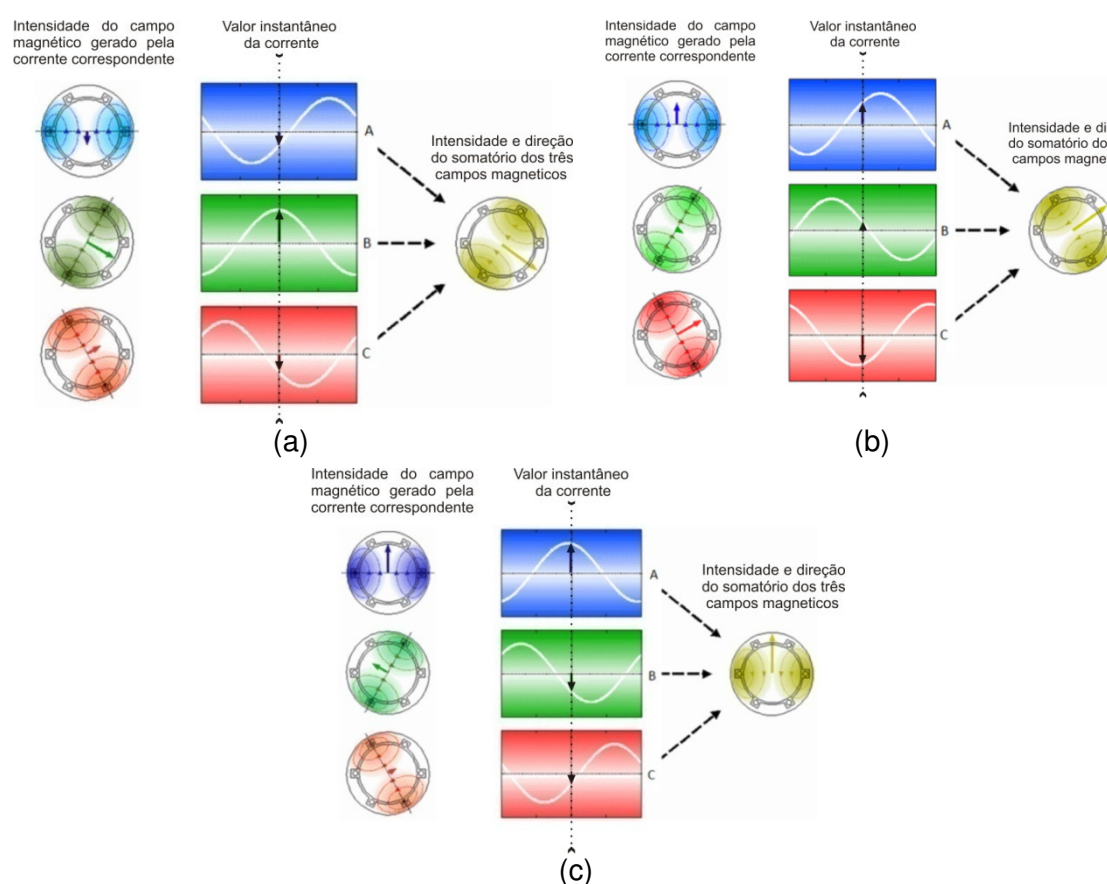


Figura 1: Campo girante no estator em diferentes instantes (a), (b) e (c).

Os enrolamentos são excitados com correntes defasadas. Dessa forma, cada uma delas gera um campo magnético em determinada direção e com magnitude proporcional à magnitude da corrente passando em cada instante. Observando a Figura 1a, é possível notar que as correntes da fase “a” e “c” estão negativas e com

magnitude pequena, enquanto a fase “b” está no pico de sua amplitude positiva. Os campos magnéticos gerados estão representados pelos vetores correspondentes a cada fase e o campo resultante é a soma desses vetores. É evidente que o vetor da fase “b” é maior e, conseqüentemente, dita a direção da resultante de campo magnético neste instante. As demais figuras que seguem (Figura 1b e 1c) mostram instantes de tempo posteriores, bem como a rotação do campo magnético resultante. É importante ressaltar que o módulo do vetor resultante é constante, ele apenas gira no espaço.

O campo girante induz uma tensão nas barras do rotor. Como estas estão curto-circuitadas, uma corrente surge nas barras que por sua vez, também geram um campo magnético. Este campo, entretanto, está atrasado em relação ao campo girante do estator. A tentativa do campo do rotor em se alinhar com o campo girante do estator faz com que surja um torque no rotor, fazendo-o girar.

A velocidade que o campo do estator girará é determinada por uma relação dos polos do motor e a frequência cujos enrolamentos são excitados. Pode-se escrever essa relação nas unidades rpm ou rad/s, conforme segue:

$$\omega_s = \frac{4\pi f_e}{\text{polos}} \text{ rad/s} \quad (1)$$

$$n_s = \frac{120 f_e}{\text{polos}} \text{ rpm} \quad (2)$$

Na equação (1), tem-se a velocidade síncrona em radianos por segundo, enquanto que na equação (2), a velocidade é expressa em rotações por minuto.

O fato de não possuir excitação no rotor faz com que o motor de indução trifásico gire numa velocidade abaixo da síncrona, ou seja, sua velocidade dependerá da carga aplicada a ele. Essa diferença entre a velocidade que o rotor gira e a velocidade síncrona é chamada de escorregamento, denotado por “s”.

O escorregamento é expresso em frações da velocidade síncrona:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3)$$

Na equação (3) tem-se os valores em rpm, em que “n_s” é a rotação síncrona e “n” é a rotação do rotor. Pode-se ainda ter:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (4)$$

Na equação (4), tem-se os valores em rad/s, em que “ ω_s ” é a velocidade síncrona e “ ω_m ” é a rotação do rotor.

2.1 - Circuito Equivalente do Motor de Indução

O circuito equivalente do motor de indução trifásico pode ser representado conforme a Figura 2. Pensar neste circuito como equivalente monofásico facilita as análises já que a tensão V_1 e a corrente I_1 são expressos em valores por fase. Para tal, é preciso considerar a máquina ligada em Y. Desta maneira, é possível obter as correntes e tensões das demais fases atrasando ou adiantando 120° as respectivas senóides. Caso se considere uma ligação Δ , a tensão V_1 será expressa pelo valor fase-fase da alimentação do motor e a corrente I_1 não será de fase e sim aquela circulante entre os ramos da ligação.

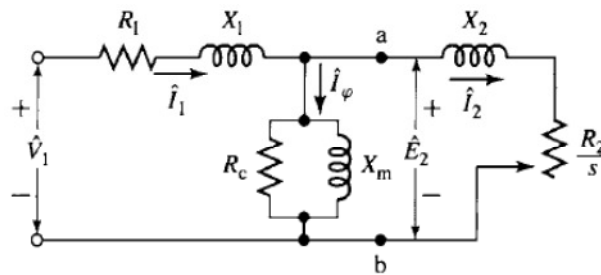


Figura 2: Circuito equivalente do Motor de Indução trifásico.

Na Figura 2, R_1 e X_1 são a resistência efetiva e reatância de dispersão do estator respectivamente. Ainda no circuito equivalente, no ramo em derivação, tem-se R_c , e X_m , que são as perdas no núcleo e a reatância de magnetização, respectivamente. A corrente I_ϕ do ramo em derivação é a corrente de magnetização, responsável por criar o fluxo de entreferro. A corrente I_2 é a corrente equivalente do rotor, evidentemente referida ao estator.

Antes de citar os dois últimos elementos do circuito equivalente, cabe ressaltar um ponto importante. O escorregamento existente no motor de indução faz com que as frequências das tensões induzidas no rotor e as tensões dos enrolamentos do estator sejam diferentes. A relação entre elas é dada por:

$$f_r = s \cdot f_e \quad (5)$$

A equação (5) relaciona a frequência no rotor, f_r , também chamada de frequência de escorregamento, e a frequência nos enrolamentos do estator, f_e .

Este ponto é importante, pois, no circuito equivalente, tem-se a impedância do rotor referida para o estator. Além disso, como a reatância varia com a frequência, é preciso que todos estes elementos do circuito estejam em função da mesma frequência. Ou seja, precisa-se que a reatância do rotor, esteja em função de f_e .

Segundo [1], como as barras do rotor estão em curto, a impedância vista pelo estator é a impedância de curto-circuito do rotor. Isto explica o fato de não haver ramo em derivação para o circuito referido, da mesma forma que é feito com transformadores. Esta impedância é dada por:

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (6)$$

A equação (6) mostra a impedância do rotor, Z_2 , referida ao estator com a resistência do rotor, R_2 , e a reatância do rotor, X_2 , também referida ao estator e em sua frequência, f_e . Os valores de R_2 e X_2 são assumidos constantes para regime permanente. Para análise do transitório o circuito equivalente é diferente e os valores de R_2 e X_2 não são constantes.

Com o circuito equivalente, pode-se determinar a potência transferida através do entreferro para o rotor por:

$$P_g = n_{fases}^2 \cdot I_2^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s} \right) \quad (7)$$

O fato de o circuito ser um equivalente monofásico faz com que na equação (7) a potência seja multiplicada pelo número de fases para compor a potência total.

De maneira semelhante, as perdas totais no rotor podem ser obtidas por:

$$P_{rotor} = n_{fases}^2 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad (8)$$

De posse das equações (7) e (8), é possível obter a potência mecânica transferida para o motor, conforme segue:

$$P_{mec} = P_g - P_{rotor} = n_{fases}^2 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (9)$$

Algumas outras equações podem ser obtidas a partir da equação (9):

$$P_{mec} = (1 - s).P_g \quad (10)$$

$$P_{rotor} = s.P_g \quad (11)$$

As equações (10) e (11) são formas simplificadas das anteriores, facilitando o cálculo das potências.

2.2 - Relação Conjugado x Velocidade

O conjugado eletromecânico, T_{mec} , se relaciona com a potência mecânica P_{mec} através da velocidade angular síncrona ou do rotor da seguinte forma:

$$P_{mec} = \omega_m.T_{mec} \quad (12)$$

$$P_{mec} = (1 - s)\omega_s.T_{mec} \quad (13)$$

A equação (12) mostra a relação da potência com o conjugado através da velocidade mecânica do rotor, enquanto a equação (13) mostra a mesma relação, porém com a velocidade síncrona. Esta é a relação crucial do presente trabalho, pois as análises de desempenho dos motores partem dela, como o quanto a velocidade do rotor cai quando há aumento de carga. A partir destas duas últimas equações, é possível obter o conjugado na seguinte forma:

$$T_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega_n} = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{n_{\text{fases}}.I_2^2.\left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_s} \quad (14)$$

O conjugado na forma da equação (14) é útil mais à frente, na análise da impedância do rotor na característica conjugado-velocidade.

Pode-se entender melhor a relação conjugado-velocidade analisando o comportamento do campo magnético gerado pela corrente do rotor.

Na Figura 3, o campo magnético B_{net} é gerado pela corrente de magnetização I_ϕ , do ramo em derivação da Figura 2. A magnitude deste campo é proporcional à tensão E_2 , que se pode considerar constante devido à queda muito pequena em R_1 e X_1 , mesmo com o aumento de carga.

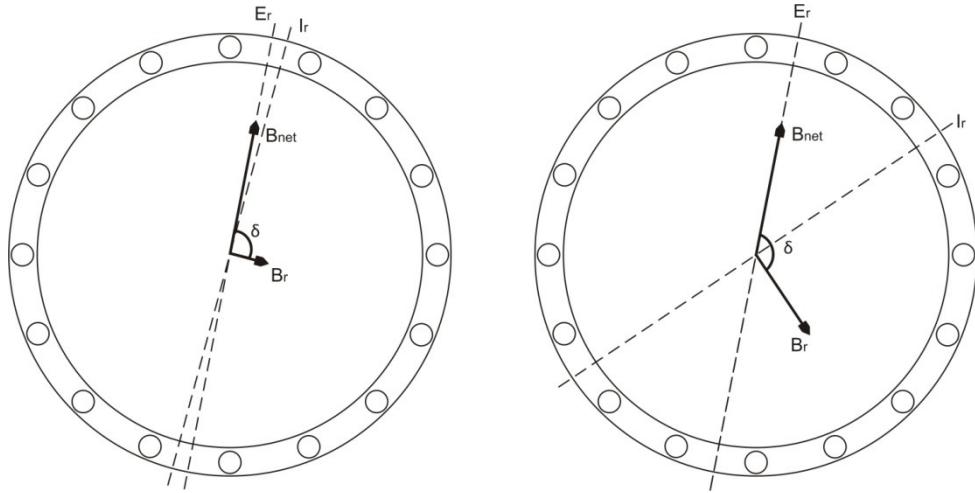


Figura 3: (a) Campo magnético no rotor com carga leve; (b) Campo magnético no rotor com carga pesada.

O campo magnético B_R é gerado pela corrente no rotor, denotada na Figura 3 por I_R , e sua magnitude é proporcional à tensão induzida E_R . A relação da tensão E_R com a tensão E_2 é dada por:

$$E_R = s \cdot E_2 \quad (15)$$

Com a equação (15) é possível perceber que no caso de carga muito leve, com o escorregamento s muito pequeno, a tensão E_R será pequena e, conseqüentemente a magnitude de B_R também.

A frequência do rotor, proporcional ao escorregamento, também será pequena, causando uma diminuição na reatância do rotor, fazendo a impedância ser predominantemente resistiva. Desta forma, a corrente e a tensão do rotor ficam quase em fase e B_R , então, fica quase a 90° de B_{net} e o comportamento do conjugado em relação à velocidade torna-se praticamente linear.

O conjugado pode ser dado por:

$$T_{mec} = k B_R \times B_{net} = k B_R B_{net} \sin \delta \quad (16)$$

A equação (16) mostra o conjugado mecânico em função dos campos magnéticos atuando no rotor, em que δ é o ângulo entre os campos B_R e B_{net} . Nela, pode-se perceber que o campo magnético B_R sendo muito pequeno, o conjugado também será.

Com o aumento de carga, o escorregamento aumenta, pois a velocidade do rotor diminui. Pode-se notar, então, que com uma carga pesada, praticamente todos os

efeitos são invertidos: E_R , B_R e f_R aumentam. O aumento da frequência produz um aumento na reatância, e conseqüentemente, a corrente I_R sofre um atraso maior em relação a E_R . Esta defasagem faz com que o ângulo δ entre o campo magnético B_R e o campo B_{net} fique maior. Neste momento dois efeitos opostos ocorrem no conjugado: enquanto B_R tende a aumentá-lo, a proporcionalidade ao $\sin\delta$ tende a diminuí-lo, já que $\delta > 90^\circ$.

Estes efeitos combinados formam a curva conjugado-velocidade característica do motor de indução, mostrada na Figura 4.



Figura 4: Característica conjugado-velocidade.

2.3 - Impedância do rotor na relação Conjugado x Velocidade

A importância da impedância do rotor na característica conjugado-velocidade do motor de indução pode ser compreendida de forma mais clara quando se obtém as fórmulas que as relacionam. Para tal, é preciso resolver o circuito da Figura 2 para a corrente I_2 e, posteriormente, inseri-las na equação do conjugado.

Existem várias maneiras de resolver o circuito da Figura 2, porém provavelmente a mais simples é encontrando o circuito Thevenin equivalente visto pelos terminais “a” e “b” do mesmo. Segundo [2], o Teorema de Thevenin determina que um circuito linear que possa ser separado do resto do sistema, pode ser substituído por uma fonte de tensão em série com uma impedância equivalente.

A fonte de tensão é a chamada tensão de Thevenin e, para o circuito em questão, é dada por:

$$V_{TH} = V_1 \left(\frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \right) \quad (17)$$

A equação (17) nada mais é que a tensão de circuito aberto dos terminais “a” e “b” do circuito da Figura 2.

A impedância equivalente é aquela vista pelos terminais em questão, com as fontes independentes desligadas. Nesse caso, Z_{TH} é dada por:

$$Z_{TH} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (18)$$

A equação (18) terá uma parte real, que será denotada por R_{TH} , e uma imaginária, denotada por X_{TH} .

O circuito da Figura 2 fica simplificado, conforme mostrado na Figura 5

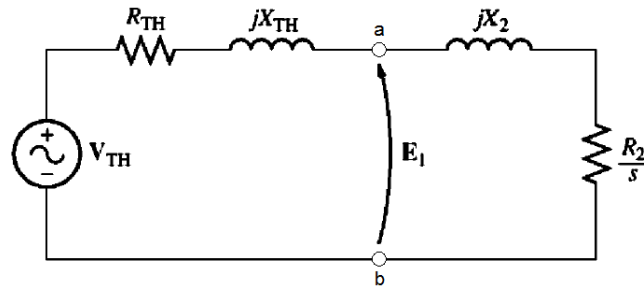


Figura 5: Circuito com o equivalente Thevenin.

Agora, a corrente I_2 pode ser expressa por:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + \frac{R_2}{s} + j(X_1 + X_2)} \quad (19)$$

De posse da equação (19), basta substituí-la na equação (14) para se obter:

$$T_{mec} = \frac{1}{\omega_s} \left[\frac{n_{fases}^2 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + j(X_{TH} + X_2)^2} \right] \quad (20)$$

O conjugado expresso dessa forma, mostrado na equação (20), é útil para encontrar o conjugado máximo. Antes disso, é preciso calcular o escorregamento máximo.

Sabe-se que o conjugado máximo ocorre quando a máxima potência é transferida para R_2/s . Isso acontece quando o módulo da impedância vista pelos seus terminais for igual a sua magnitude. Ou seja:

$$\frac{R_2}{s_{max}} = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad \therefore \quad s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (21)$$

Desta forma, é possível observar que o escorregamento máximo é proporcional à resistência R_2 . Substituindo a equação (21) na (20), tem-se o conjugado máximo dado por:

$$T_{max} = \frac{1}{\omega_s} \left[\frac{0,5 \cdot n^o_{fases} \cdot V_{TH}^2}{R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \right] \quad (22)$$

O conjugado máximo independe do valor de R_2 , conforme se pode verificar na equação (22).

A resistência do rotor muda apenas o ponto de conjugado máximo em relação à velocidade, mas não tem relação com sua magnitude. A Figura 6 mostra claramente o que acontece com a característica conjugado-velocidade com o aumento de R_2 .

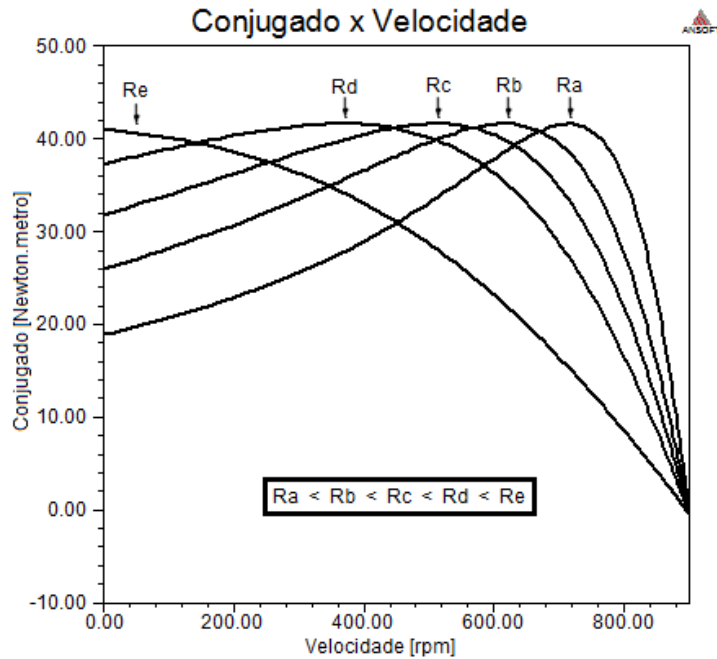


Figura 6: Efeito da variação da resistência do rotor na característica conjugado-velocidade de um motor de indução trifásico.

As resistências R_a a R_e são os diferentes valores da resistência do rotor, R_2 . O conjugado máximo não muda seu valor, porém a curva passa a ter uma característica diferente.

A forma das ranhuras do rotor influencia nos valores da impedância do mesmo, e consequentemente, influência na característica conjugado-velocidade. Portanto, os valores de R_2 e X_2 podem ser maiores ou menores dependendo de como a ranhura foi projetada.

A reatância X_2 representa o fluxo de dispersão do rotor, ou seja, aquele que não concatena o circuito magnético estator-rotor, quanto mais distante a barra estiver do rotor, maior será a dispersão.

Um rotor com alta resistência R_2 possui um conjugado de partida maior, porém, seu conjugado máximo fica distante da velocidade síncrona, ou seja, o escorregamento é maior. Lembrando que quanto maior o escorregamento, menor a potência transferida pelo gap.

Os motores de indução são divididos em classes de acordo com seu comportamento conjugado-velocidade. As classes variam de “A” a “D” e suas curvas típicas são mostradas na Figura 7 com valores percentuais da velocidade síncrona e do conjugado de plena carga.

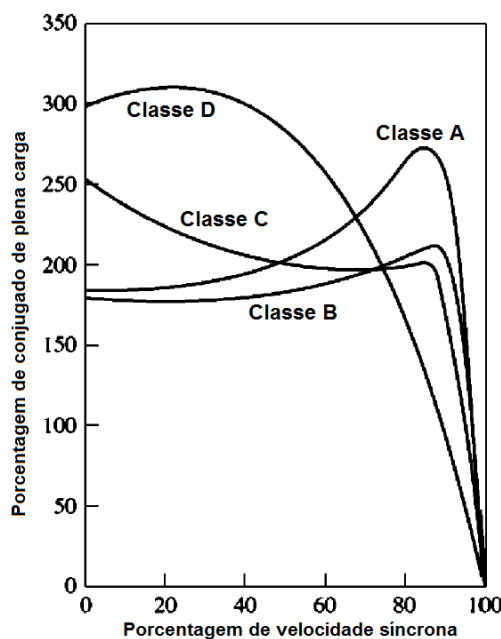


Figura 7: Curvas típicas das classes dos motores de indução.

2.4 - Classe dos motores

De forma resumida, as características dessas classes são:

2.4.1 - Classe A:

Esta classe possui conjugado de partida normal e baixo escorregamento. Sua principal desvantagem é a corrente de partida, que fica entre 500 a 800 por cento da corrente nominal. A potência típica desses motores fica abaixo da faixa de 7,5 HP e acima de 200 HP, porém esta classe tem sido substituída por motores de classe B mesmo nestas faixas de potência.

Com conjugado nominal, seu escorregamento é próximo dos 5%, enquanto que no conjugado máximo, este aumenta para 20%.

As ranhuras do rotor típica desta classe são mostradas na Figura 8.

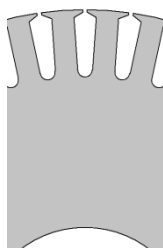


Figura 8: Ranhuras típicas do motor classe A.

Na Figura 8 pode-se observar que as barras desse motor são largas o suficiente para ter baixa resistência, o que provê um escorregamento baixo e velocidade próxima à síncrona quando atinge o conjugado máximo. Além disso, a proximidade das barras à superfície provê uma baixa reatância, o que aumenta o pico de conjugado.

2.4.2 - Classe B:

Motores semelhantes aos de classe A, porém com corrente de partida menor. Seu conjugado de partida é um pouco inferior aos da classe anterior, porém, quando à plena carga, possui escorregamento igualmente baixo e eficiência semelhante. As aplicações para este tipo de motor são as mesmas das de classe A, em que conjugado de partida e corrente de partida não são severos.

A Figura 9 mostra a ranhura típica dos motores de classe B, barras mais profundas e mais largas.

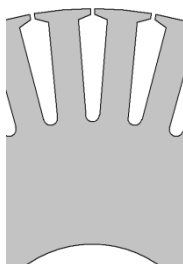


Figura 9: Ranhuras típicas do motor classe B.

Um fenômeno interessante ocorre nesses motores devido às barras profundas, assim como ocorrem nos de classe C, que possuem barras duplas. A profundidade dessas barras faz com que haja uma diferença na reatância ao longo dela, devido ao fluxo de dispersão ser diferente conforme a distância à superfície aumenta.

Pensando em cada barra como uma junção de lâminas pequenas, pode-se notar a diferença de fluxo de dispersão de acordo com a profundidade dessas lâminas. A Figura 10a mostra uma corrente orientada para dentro da página com seu fluxo de dispersão pequeno, já que está próximo à superfície.

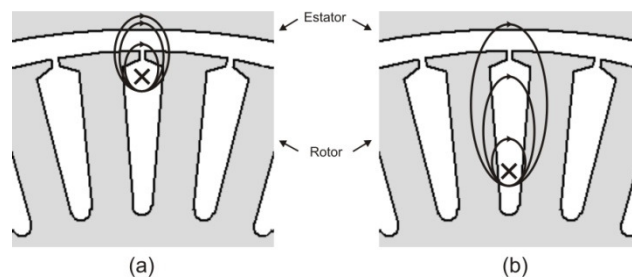


Figura 10: Fluxo de dispersão na (a) superfície e (b) na base da ranhura do rotor.

Já a Figura 10b mostra um fluxo de dispersão maior, pois está na base da ranhura do rotor. Lembrando mais uma vez, que a dispersão se dá pelo fluxo que não é concatenado pelo circuito magnético estator-rotor, ou seja, não acoplam magneticamente as bobinas do estator e as barras do rotor. Observa-se que na Figura 10b há mais linhas de fluxo que não estão chegando a acoplar com o estator.

Referindo-se ainda às lâminas imaginárias da barra, elas estão em curto pelos anéis condutores em suas extremidades, como se fossem diversos ramos em paralelo, conforme mostrado na Figura 11.

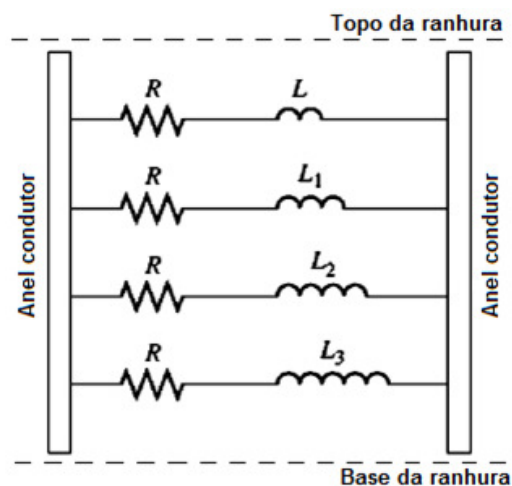


Figura 11: Esquemático das lâminas imaginárias das barras.

Com um escorregamento baixo, ou seja, com velocidades maiores, a frequência das correntes do rotor também é baixa e, conseqüentemente, a reatância também. Neste momento, a reatância torna-se desprezível em comparação a resistência de cada ramo. Como a barra é consideravelmente larga, a resistência também é baixa. Resumindo, com um escorregamento baixo, obtém-se baixa reatância e resistência, provendo um conjugado máximo mais alto e reduzindo as perdas.

Já com um escorregamento alto, típico na partida e para velocidades baixas, a frequência das correntes no rotor aumenta. Assim, a reatância se torna alta em relação à resistência de cada ramo. Entretanto, como os valores de indutância equivalente são diferentes em cada ramo, as reatâncias também são, ou seja, quanto mais perto da base da ranhura, maior a reatância. A corrente, portanto, tende a se concentrar no ramo com menor impedância, no caso, aquele que tem menor reatância. Isso causa uma área efetiva de passagem de corrente menor e sabe-se que quanto menor a área, maior a resistência. Dessa forma, a resistência do rotor vista pelo estator, torna-se maior, o que provê um conjugado de partida maior e uma corrente de partida relativamente menor.

2.4.3 - Classe C:

Em comparação às classes anteriores, os motores de classe C possuem um conjugado de partida mais elevado, com uma corrente de partida relativamente menor. Entretanto, devido ao escorregamento ser um pouco mais elevado que as classes anteriores, sua eficiência é um pouco menor. Essa diferença se dá pelo uso das barras duplas como pode ser visto na Figura 12.

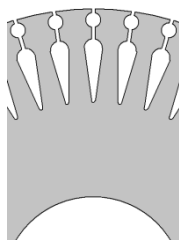


Figura 12: Ranhuras típicas do motor classe C.

Nas barras duplas, o efeito da concentração de corrente e diferença de reatância ao longo da barra é ainda maior, pois com alto escorregamento, a passagem de

corrente efetiva se reduz à barra menor, mais próxima à superfície. O resultado disso é um conjugado de partida maior.

O rotor de gaiola dupla, por possuir um processo de fabricação mais sofisticado, tem custo maior em relação aos das classes anteriores. Além disso, há diferenças construtivas nos tipos de gaiolas duplas, conforme descrito em [3]. O rotor pode possuir um único anel condutor para o conjunto de barras, ou ainda anéis condutores individuais, ou seja, um para as barras superiores e outro para as inferiores. Na prática se usa anéis individuais, pois as barras, neste caso, podem ter dilatações independentes. As barras podem, ainda, apresentar entre elas uma capa de alumínio, a fim de atuar como distribuidor de calor entre elas.

2.4.4 - Classe D:

Classe de motores com elevado conjugado de partida com baixa corrente de partida. Por outro lado, possui alto escorregamento em carga nominal. Seu uso é comum em atividades com uma aceleração ou conjugado de partida elevados, como cargas de alta inércia, como prensas perfuradoras, máquinas de cortar chapas, acionamento de cargas de alto impacto e outras.

Devido às suas barras serem pequenas e muito próximas à superfície, como mostrado na Figura 13, sua resistência é elevada. Além disso, o material utilizado no projeto do motor é de alta resistividade, a fim de aumentar ainda mais o conjugado de partida, com conjugado máximo atingido com baixíssima velocidade.

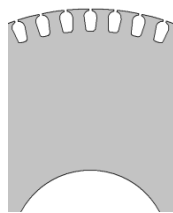


Figura 13: Ranhuras típicas do motor classe D.

2.5 - Partidas com tensão reduzida

A corrente de partida dos motores de indução trifásicos é um dos principais problemas para as redes de distribuição. Com valores variando de 3 a 8 vezes a sua corrente nominal a plena carga, a corrente de partida exige que o sistema ao qual o motor é ligado seja preparado para suporta-la. Os altos picos de corrente podem gerar

afundamento de tensão, que pode comprometer o funcionamento de equipamentos ligados a esta rede.

O cuidado com a corrente de partida preserva a rede de distribuição como um todo, e ainda evita gastos elevados com contratação de demandas maiores da empresa de distribuição de energia. Além disso, altas correntes podem afetar sistemas de proteção, causando desligamentos indevidos.

Para reduzir a corrente de partida existem diversas técnicas que utilizam dispositivos que diminuem a tensão de alimentação do estator durante a partida. Dentre essas técnicas, pode-se citar: partida com chave estrela-triângulo, partida com autotransformador, soft-starter, partida com resistência intercalada e partida com indutância intercalada. O presente trabalho foca apenas nas duas primeiras.

2.5.1 - Partida com chave estrela-triângulo

A utilização da chave estrela-triângulo exige que se tenha acesso aos seis terminais dos enrolamentos do estator do motor, nos quais a chave será ligada. Esta técnica consiste em partir o motor com a ligação dos enrolamentos em estrela, fazendo com que a tensão aplicada a cada bobina seja a tensão da rede dividida por $\sqrt{3}$. No instante seguinte, a ligação é aberta e uma ligação delta é feita, fazendo com que as bobinas tenham a tensão da rede aplicada a elas. Estas mudanças podem ser feitas de forma manual, semiautomática ou automática.

É de suma importância que a menor tensão nominal em triângulo do motor coincida com a tensão nominal da rede, de forma a evitar perda de isolamento e danos à máquina, ao operador e/ou ao sistema. A Figura 14 mostra como é feita a ligação da chave estrela-triângulo a um motor de indução trifásico.

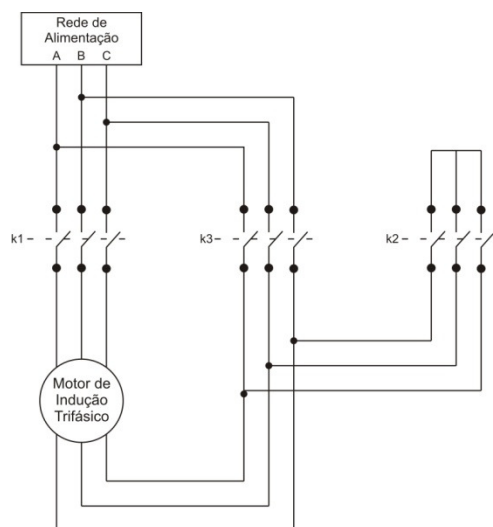


Figura 14: Circuito trifilar de ligação da chave estrela-triângulo.

Quando o motor parte, os contatos k1 e k2 do circuito da Figura 14 são fechados e, dessa forma, os enrolamentos são ligados em estrela. Quando a máquina atinge uma velocidade próxima a 90% da nominal os contatos k2 são abertos e posteriormente os contatos k3 são fechados, ligando o motor em delta. Entre a abertura dos contatos k2 e o fechamento dos contatos k3 existe um tempo de segurança de forma a evitar o curto-circuito das fases.

É importante ressaltar que esta partida faz com que o conjugado de partida caia pra 33% do conjugado com partida direta, já que o conjugado varia com o quadrado da tensão de alimentação. Consequentemente, o motor deve partir a vazio ou com uma carga muito leve. Além disso, a súbita abertura da ligação em estrela causa um pico de corrente devida à força contra-eletromotriz do motor. Dessa forma, em motores de determinada potência, esse dispositivo não é o ideal, já que o transitório da passagem para a ligação triângulo pode conter picos de correntes ainda altos.

2.5.2 - Partida com autotransformador ou chave compensadora

Da mesma forma que a partida com chave estrela-triângulo, a partida com autotransformador visa reduzir o pico de corrente na partida do motor de indução trifásico. Porém, o conjugado de partida disponível neste tipo de partida é mais alto que o anterior. A tensão de alimentação do estator do motor é dada pelos TAP's do autotransformador, que por sua vez, possuem valores padrões de 50%, 65% e 80% da tensão nominal.

Como o conjugado varia com o quadrado da tensão, pode-se obter um conjugado de até 64% do conjugado com partida direta, usando tap de 80% da tensão de rede. Na partida, o motor é ligado ao autotrafo inicialmente com o primário ligado em estrela. Posteriormente, a ligação estrela do autotrafo é aberta. Neste instante, parte do primário funciona como uma indutância em série com o motor, com alimentação direta da rede. Em seguida o autotrafo é curto-circuitado e o motor é ligado diretamente à rede.

A Figura 15 mostra como é feita a ligação do motor de indução trifásico para a partida com autotrafo.

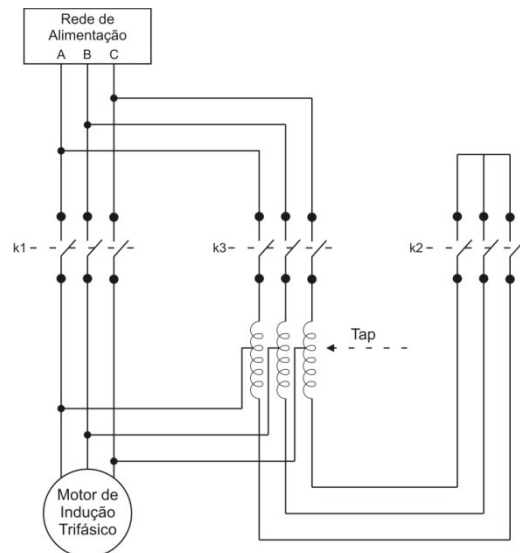


Figura 15: Circuito trifilar de ligação para partida com autotrafo.

Quando o motor é ligado, os contatos k3 e k2 estão fechados. Os contatos k2 são responsáveis por ligar o primário do autotransformador em estrela. Pode-se observar que o motor é ligado ao tap do autotransformador. Quando o motor atinge uma velocidade próxima de 90% da nominal, os contatos k2 são abertos, desfazendo a ligação estrela do primário do autotrafo. Nota-se que, neste instante, a parte da bobina do autotrafo desde a entrada até seu tap funciona como um indutor, já que o restante da bobina está com os terminais abertos. Em seguida, os contatos k3 abrem e os contatos k1 fecham, fazendo com que o motor seja alimentado diretamente da rede.

Neste tipo de partida não há interrupção de corrente, portanto os picos de corrente do motor são menores se comparados à partida anterior. Entretanto, a partida com autotransformador tem um custo maior do que a partida com chave estrela-triângulo. Além disso, é necessário um espaço físico maior, acarretando uma área maior dos centros de controle de motores.

Capítulo 3 - Programas usados e suas configurações

Nesta seção são apresentados os programas da Ansoft, usados nas simulações, bem como a explicação dos passos e configurações realizados nos mesmos. Os softwares usados para a modelagem dos motores foram o RMxpert, Maxwell 2D, ambos contidos no Maxwell 15. Os subitens subsequentes trazem detalhes do que foi feito em cada um deles.

3.1 - RMxpert

Software da Ansoft contido no pacote Maxwell que facilita o processo de projeto e otimização de máquinas elétricas rotativas. Com ele, é possível calcular o desempenho da máquina facilmente após a montagem do modelo em questão. Além disso, pode-se refinar o modelo criado, escolher materiais diferentes, integrar com circuitos de controle e eletrônica de potência com muita facilidade.

O RMxpert possui inúmeros modelos específicos de máquinas de indução, síncrona e máquinas de comutação eletrônica e por escovas. O programa trabalha com uma interface com base nesses modelos, que permite ao usuário desenhar e otimizar a máquina apenas inserindo os parâmetros respectivos ao modelo escolhido.

Os cálculos realizados pelo programa utilizam a teoria analítica clássica de motores e seus circuitos magnéticos equivalentes, além de realizar cálculos levando em consideração comportamentos magnéticos não lineares como a curva de saturação do material.

Uma função importante, que foi usada para o presente trabalho, é a geração automática de geometria 2D ou 3D dos modelos criados exportando-os para o Maxwell 2D ou 3D. Além disso, o RMxpert se integra com o Simplorer, para que sejam simulados comportamentos com topologias de controle, carga e interação com outros sistemas.

É possível criar rapidamente diversos gráficos com as variáveis de simulação, como a característica conjugado-velocidade, corrente de entrada, potência, dentre outros. Depois de gerados, os gráficos ainda podem ser editados de diversas formas, quanto a escala, cor, grid, marcar pontos específicos etc. Além disso, é possível exportar os dados para uma planilha em Excel ou Matlab.

Os parâmetros e configurações foram feitos com base na leitura do material de ajuda disponível do próprio software em [4]. A seguir, são descritos os passos usados para a simulação.

3.1.1 - Escolha do exemplo

Conforme dito anteriormente, o software possui modelos de máquinas prontas para a inserção dos parâmetros, o qual para este estudo é o de motor de indução trifásico. Porém, o RMXprt possui exemplos de motores já configurados, ou seja, já com parâmetros inseridos. Por outro lado, o software permite criar a própria máquina elétrica, bastando apenas escolher o tipo, máquina de indução monofásica ou trifásica, máquina síncrona, máquina de corrente contínua, dentre outros. Como o foco deste trabalho não é o desenvolvimento da máquina, foi usado um exemplo do RMXprt e aplicadas as configurações necessárias.

Para visualização de exemplos o software tem dentro do menu “File” a opção “Open Examples”, conforme pode ser visto na Figura 16.

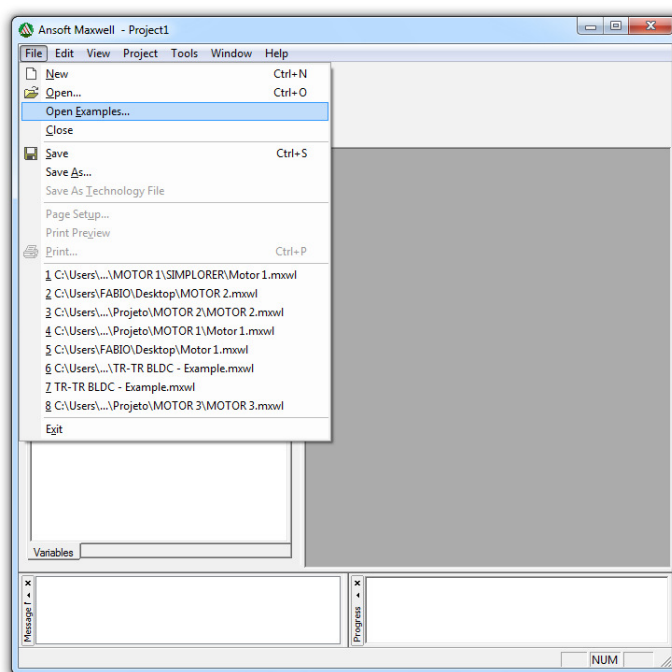


Figura 16: Opção para visualização de exemplos.

Os exemplos disponíveis são organizados nas pastas Maxwell 2D, Maxwell 3D e RMXprt. O exemplo escolhido foi o motor de indução trifásico do RMXprt de 8 polos,

cujo nome do arquivo é “yzd132-8.mxl”. Para executar qualquer simulação de um exemplo, é preciso salvá-lo em um local diferente da pasta de origem.

Com o modelo aberto, as opções referentes ao projeto ficam disponíveis numa seção chamada de “Project Manager”, conforme destacado na Figura 17. Os parâmetros construtivos do motor ficam contidos no subitem “Machine”, divididos em “Stator” e “Rotor”, além do item “Shaft” cujo possui a opção se eixo será de material magnético ou não.

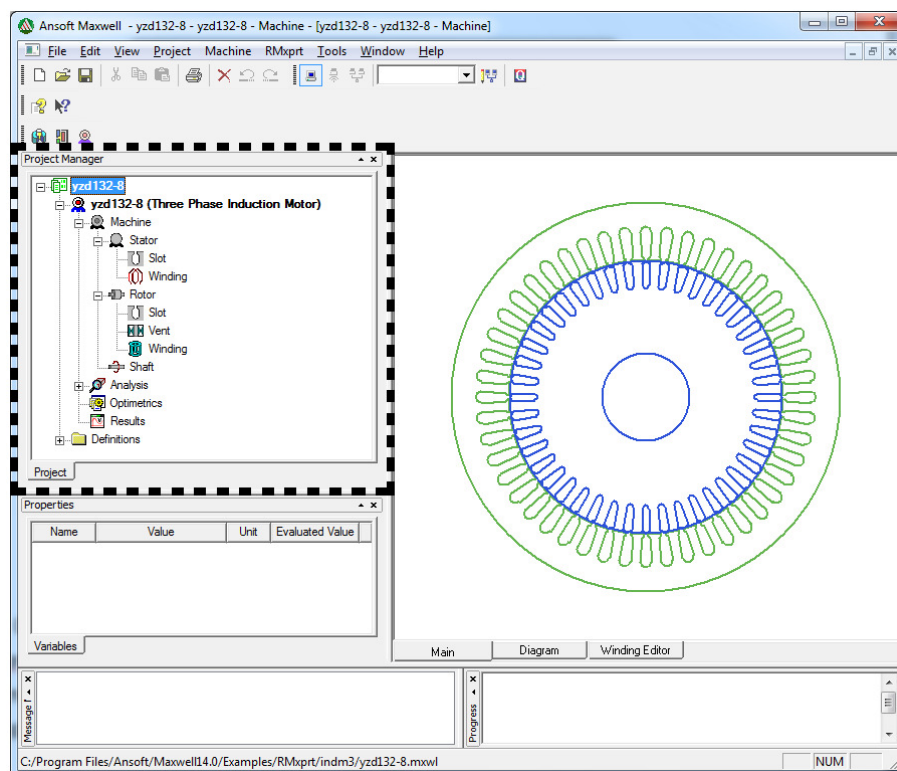


Figura 17: Seção “Project Manager” destacada.

Com um duplo clique em “Machine”, é possível alterar o número de polos, fator de perdas, perdas por atrito e ventilação a uma determinada velocidade de referência, conforme mostrado na Figura 18. Os valores do exemplo foram mantidos.

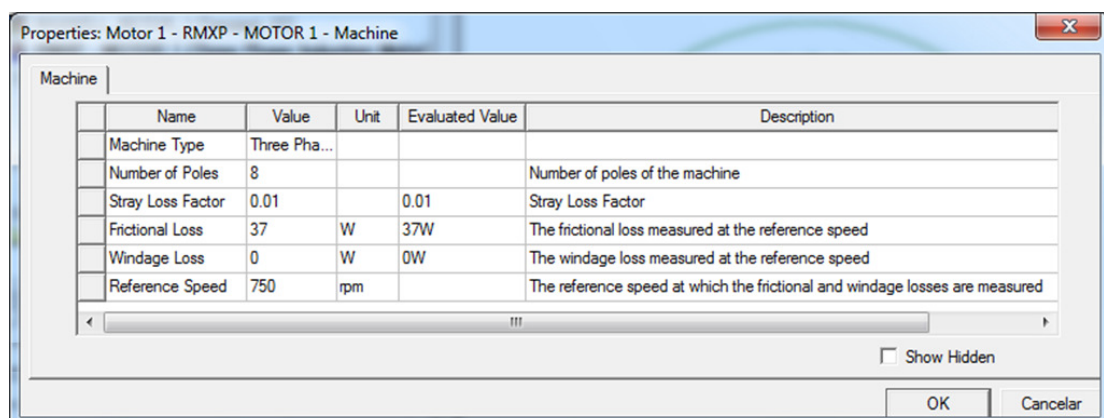


Figura 18: Propriedades da máquina.

3.1.2 - Parâmetros do estator

O exemplo escolhido já possui os parâmetros do estator configurados. Como o foco das simulações é no comportamento do motor com diferentes ranhuras do rotor, os parâmetros usados foram do próprio exemplo, mantendo-os para todos os motores simulados. Entretanto, são apresentadas formas de configurar alguns desses parâmetros.

Clicando duas vezes no menu “Stator”, pode-se configurar as dimensões do estator, fator de empilhamento, número de ranhuras e suas dimensões, o material do estator, além de outras opções conforme Figura 19.

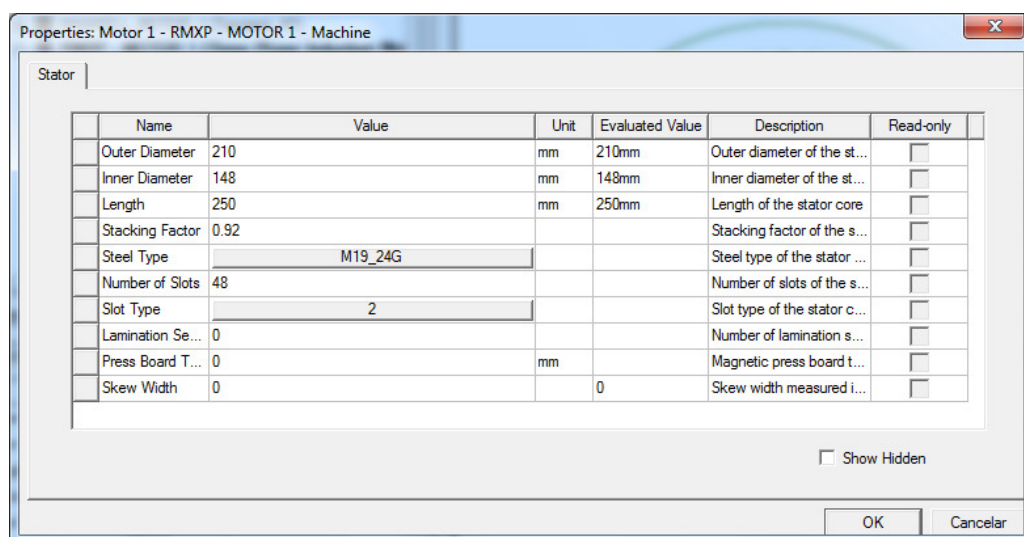


Figura 19: Parâmetros do estator.

No botão ao lado de “Steel Type” da Figura 19, pode-se escolher o tipo de material do estator. O software disponibiliza uma série de materiais, com suas respectivas densidade, condutividade elétrica, curva de saturação, além de outros parâmetros. Por outro lado, é possível cadastrar um material novo com novas características e até sua própria curva de saturação, que pode inclusive ser importada de uma planilha Excel.

Ao clicar no botão com um número 2 que aparece ao lado de “Slot Type” é possível escolher o tipo de ranhura que o estator terá. O RMXprt tem tipos de ranhuras pré-definidas as quais podem ter suas dimensões alteradas, e ainda uma opção para o usuário criar seu próprio tipo de ranhura. As dimensões das ranhuras são alteradas clicando na opção “Slot” do estator. A ranhura configurada é do tipo 2 e suas dimensões são mostradas na Figura 20.

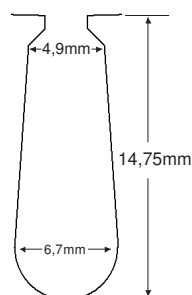


Figura 20: Dimensões da ranhura do estator.

A opção “Winding” diz respeito às propriedades dos enrolamentos, quantidade de condutores por ranhura, número de fios por condutor, diâmetro do condutor e o tipo de ordenação do enrolamento. O software possui dois tipos automáticos e ainda possibilita que o usuário organize de maneira própria os enrolamentos. No caso do estator do exemplo, ele já possuía uma organização personalizada, conforme Figura 21.

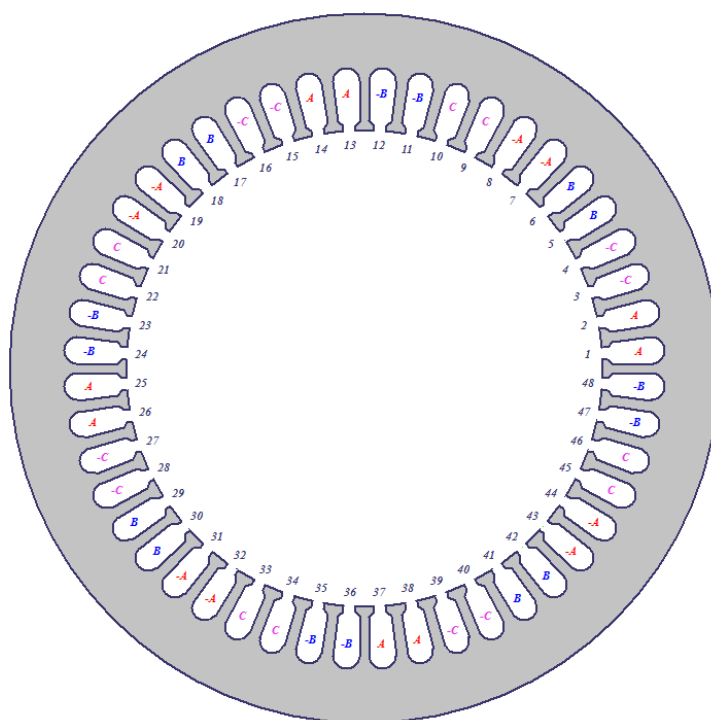


Figura 21: Organização dos enrolamentos do estator.

3.1.3 - Parâmetros do rotor

A opção “Rotor” vista na Figura 17, possui parâmetros semelhantes à opção “Stator”. Pode-se configurar o tamanho, diâmetro, quantidade de ranhuras e tipo do material do rotor. O diâmetro externo do rotor foi configurado de forma a deixar um

entreferro de 0,7 mm para estator. O campo “Slot type” foi configurada como “UserDefinedSlot” para todos os motores, parâmetro o qual permite desenhar a ranhura da maneira desejada.

Abaixo da opção “Rotor”, aparece a opção “Slot”, na qual serão feitas as configurações das ranhuras, a opção “Vent”, na qual podem ser definidos parâmetros de ventilação, e a opção “Winding”, que define o tipo dos materiais usados nos barramentos do rotor e no anel condutor, bem como suas dimensões. Os parâmetros de ventilação não foram usados, e os materiais para o barramento e anel condutor foram mantidos os do próprio exemplo. As dimensões e formas das ranhuras de cada motor são apresentadas na Figura 22.

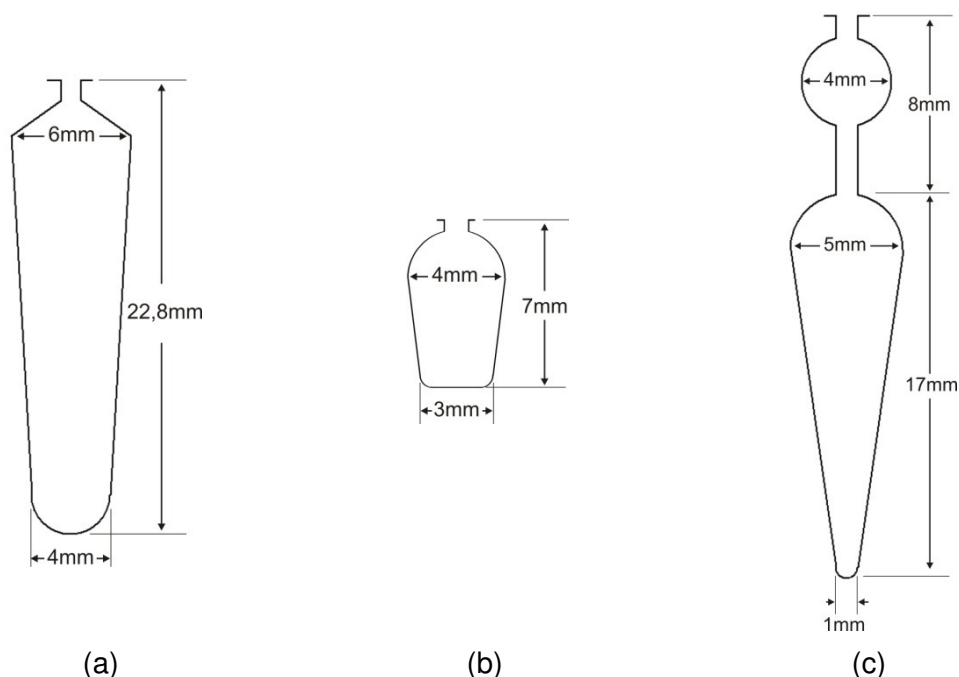


Figura 22: Dimensões das ranhuras: (a) Motor 1 ; (b) Motor 2 ; (c) Motor 3.

Além das diferenças na forma, os motores simulados também se diferenciam pela quantidade de ranhuras. Os motores 1 e 3 possuem 44 ranhuras, enquanto o motor 2 possui 60.

3.1.4 - Parâmetros de Análises

Antes de iniciar a análise, é preciso primeiro criar um “Solution Setup”. Para isso, deve-se clicar com o botão direito na opção “Analysis”, que pode ser vista na Figura 17, e em seguida clicar em “Add solution setup”. A janela que permite a configuração dos parâmetros da análise e é dividida em abas, conforme pode ser visto na Figura 23.

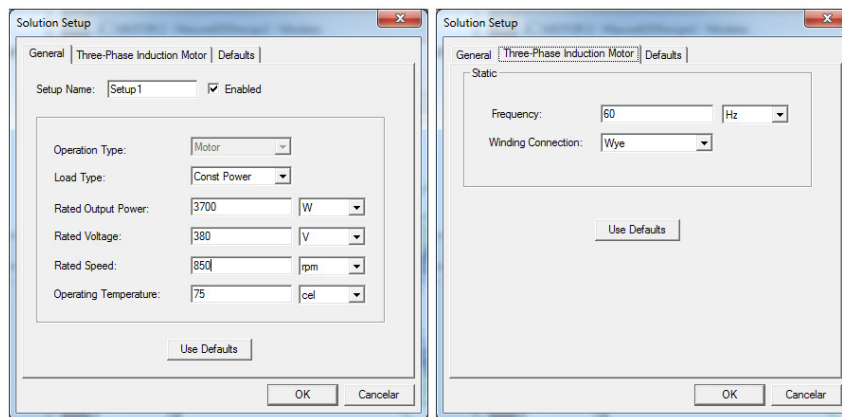


Figura 23: Janela de “Add solution setup”.

Na aba “General”, pode-se escolher o tipo de carga a ser considerada como potência constante, velocidade constante, conjugado constante, dentre outros. É preciso determinar os valores nominais de potência de saída, tensão e velocidade, além da temperatura de operação. Os valores padrões do exemplo foram usados, sendo 3700 W de potência nominal, 380 V de tensão nominal, 850 rpm de velocidade nominal e 75°C de temperatura de operação. Além disso, foi deixado como “Potência constante” o tipo de carga. Na aba “Three-Phase Induction Motor”, pode-se escolher a frequência das bobinas e sua ligação delta ou estrela. Foi escolhida uma frequência de 60 Hz e a ligação em estrela.

Após entrar com os dados de análise, deve-se validar o modelo antes da simulação para encontrar possíveis erros de configuração, clicando no menu RMxprt e em seguida em “Validation Check”. Se estiver tudo correto, deve-se, em seguida, clicar novamente em RMxprt e depois em “Analyse All”. As opções descritas estão destacadas na Figura 24.

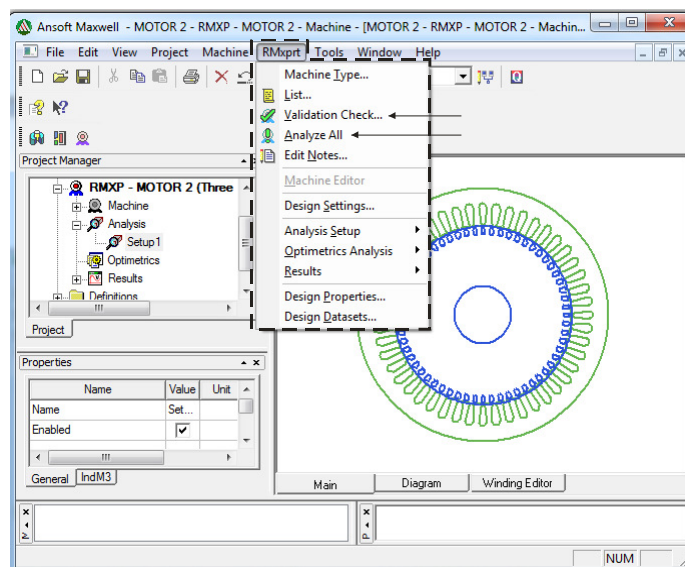


Figura 24: Opções para início da análise.

3.1.5 - Opções de resultados

Report: MOTOR 2 - RMXP - MOTOR 2 - New Report - New Trace(s)

Context

Solution: Setup1 : Performance

Domain: Speed

Update Report

☒ Real time

Trace Families Families Display

Primary Sweep: RSpeed All

X: ☒ Default RSpeed

Y: InputCurrent

Category: Variables, Output Variables, **Current**, Misc., Percentage, Power, Torque

Quantity: filter-text, InputCurrent

Function: <none>, abs, acos, acosh, ang_deg, ang_rad, asin, asinh, atan, atanh, cos, cosh, dB, dB10normalize, dB20normalize, dBc, dBS

Observa-se que há uma variedade de grandezas analisadas para ser escolhida para o eixo Y, como corrente de entrada, potência, torque etc. No eixo X a grandeza padrão é a velocidade do motor, porém, pode-se desmarcar a caixa “Default” para ter acesso à escolha das mesmas variáveis disponíveis para o eixo Y.

27

3.2 - Maxwell – Maxwell 2D

O pacote de softwares Maxwell 15 é um abrangente programa de simulação de campos eletromagnéticos para projeto e análise de estruturas 2D e 3D, como motores, atuadores, transformadores e outros dispositivos elétricos e eletromecânicos. Baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), o Maxwell é capaz de simular campos eletromagnéticos estáticos, no domínio do tempo ou no domínio da frequência. As malhas usadas no MEF são calculadas e criadas automaticamente no modelo de acordo com a precisão escolhida pelo usuário. Este software pode, ainda, ter seus modelos combinados ao Simplorer para integrá-los a circuitos complexos, como circuitos de controle.

O Maxwell possui seis tipos de solução 2D/3D: Magnetostático, Eletrostático, Correntes de Foucault, Transitório, Condução AC e Condução DC. Nas simulações foi usado apenas o Maxwell 2D no modo de análises transitórias.

Boa parte das configurações realizadas no modelo foi feita de forma automática pelo RMXprt exportando para o Maxwell 2D o modelo feito com base no exemplo escolhido. A seguir, os principais parâmetros configurados automaticamente e também aqueles realizados manualmente, são explicados, além dos passos usados na simulação.

3.2.1 - Criando o modelo

A criação do modelo pode ser feita diretamente na janela “Project Manager”, clicando no nome do projeto com o botão direito e escolhendo a opção “Insert”, conforme Figura 26. Em seguida, deve-se clicar em “Insert Maxwell 2D design”.

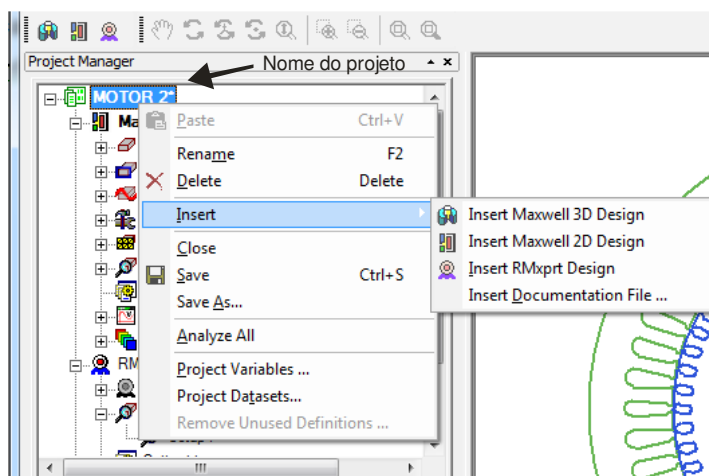


Figura 26: Inserção de um modelo.

Por este caminho, o desenho do modelo fica a cargo do usuário. Porém, para o presente trabalho, o modelo foi exportado e criado pelo RMXprt. Após a criação do modelo, as opções disponíveis de inserção de parâmetros são mostradas no “Project Manager”, conforme Figura 27.

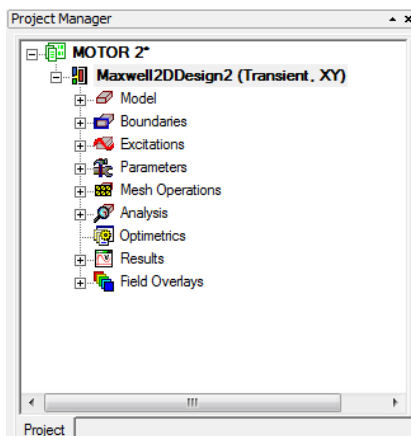


Figura 27: Parâmetros de um modelo Maxwell 2D.

3.2.2 - Parâmetro “Model”

Este parâmetro define qual parte do desenho terá movimento e, como o modelo foi exportado, o programa definiu esta parte automaticamente. Ao clicar na opção “Model”, aparece o subitem “MotionSetup”, que define as configurações de movimento. Com um duplo clique em “MotionSetup”, aparece a janela de configuração para a entrada dos valores, a qual é dividida em três abas: “Type”, “Data” e “Mechanical”. As abas são mostradas nas Figura 28, Figura 29 e Figura 30.

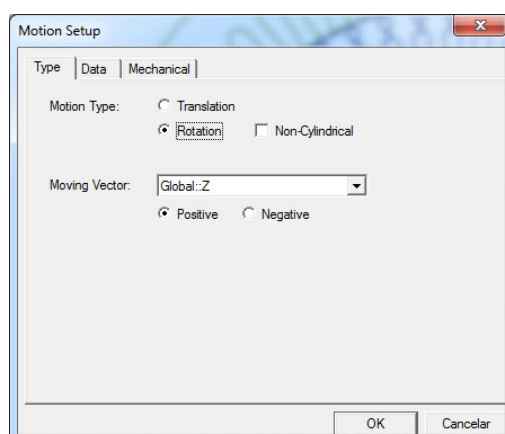


Figura 28: MotionSetup – aba Type.

A aba “Type” possui o tipo de movimento da parte selecionada, neste caso, será rotacional. A opção “Moving Vector” configura em relação a que eixo ocorrerá o movimento. Nos modelos simulados, o eixo Z foi escolhido automaticamente.

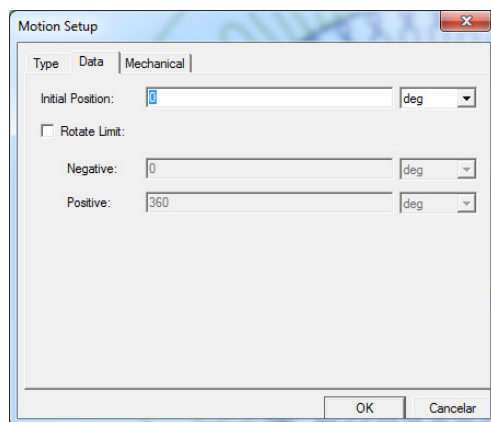


Figura 29: MotionSetup – aba Data.

A aba “Data” permite configurar a posição inicial e os limites de rotação do movimento. Para os motores simulados, a posição inicial foi zero e obviamente não teve limite de rotação.

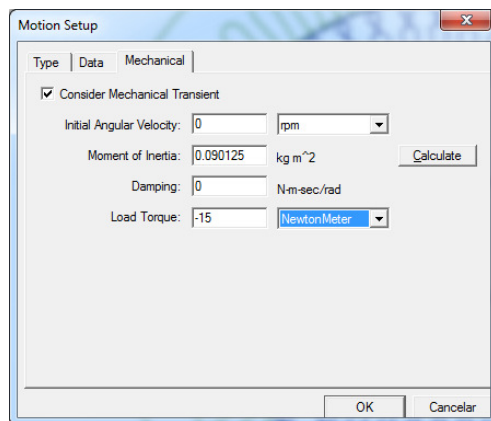


Figura 30: MotionSetup – aba Mechanical.

A última aba, “Mechanical”, possui os parâmetros mecânicos transitórios, como velocidade angular inicial, momento de inércia, amortecimento e conjugado de carga. Para que o Maxwell calcule automaticamente o momento de inércia, é preciso que o desenho seja centrado no eixo Z. Apesar dos modelos simulados mostrarem apenas um quarto do motor, este valor foi calculado no momento da criação pelo RMxprrt. É importante ressaltar que o valor do torque de carga deve ser contra o movimento do rotor, nesse caso negativo. Os valores mostrados na Figura 30 foram usados para os três motores.

3.2.3 - Parâmetro “Boundaries”

Este parâmetro define as condições de fronteira do modelo. Na criação automática foi gerado um contorno externo para definir o potencial como condição de fronteira. Além disso, dois eixos “master” e “slave” foram criados para a determinação de periodicidade, de forma que o campo magnético em cada ponto do eixo “slave” é forçado a corresponder ao campo magnético do respectivo ponto no eixo “master”. Isso garante que o efeito visto no 1/4 de motor que aparece no modelo, se repita de forma idêntica nos outros quadrantes do motor.

3.2.4 - Parâmetro “Excitations”

São as propriedades dos enrolamentos do estator e das barras do rotor. Na criação manual, é neste campo que se define quais bobinas pertencerão a cada fase. A Figura 31 ilustra melhor esta como o Maxwell trata este agrupamento.

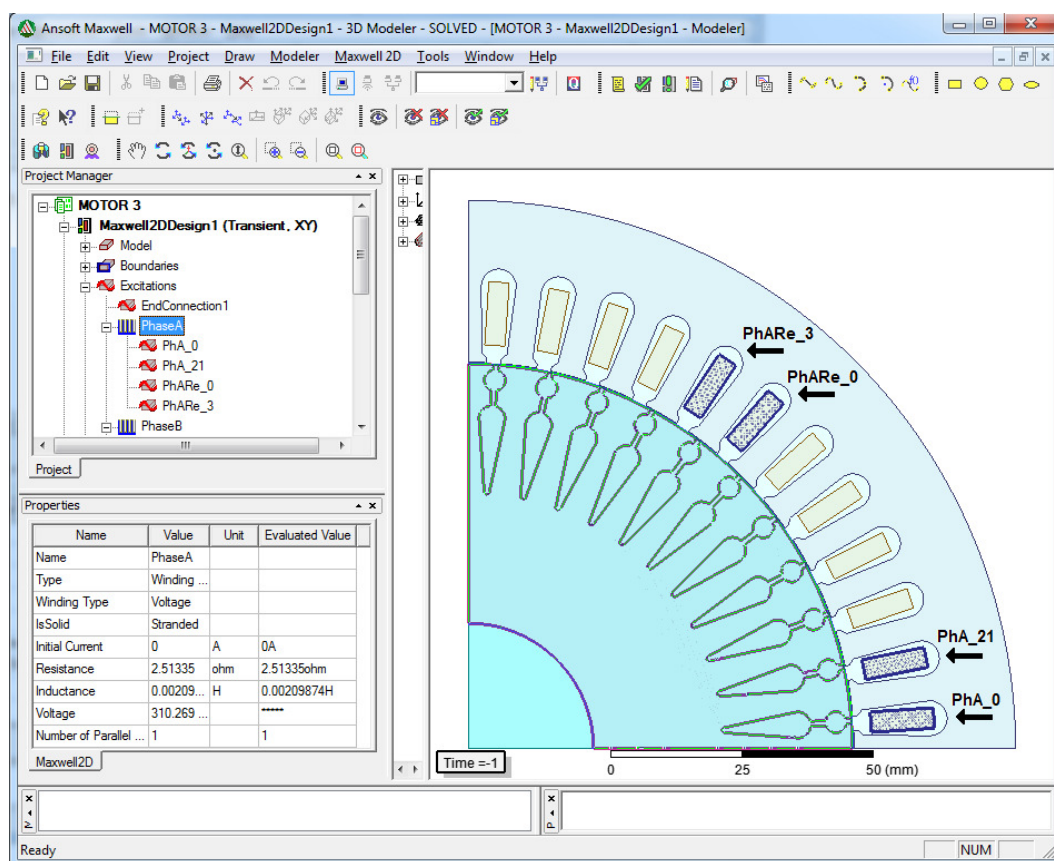


Figura 31: Agrupamento e parâmetros dos enrolamentos.

Na Figura 31, pode-se observar que o enrolamento da fase A possui duas bobinas representadas pelos condutores “PhA_0”, “PhA_21”, “PhARe_3” e “PhARe_0”. O Maxwell não faz distinção qual condutor pertence a qual bobina, mas sim a direção

da corrente nos condutores. Por exemplo, neste caso, os condutores “PhA_21” e “PhA_0” estão orientados positivamente, ou seja, a corrente tem sentido para dentro da folha, enquanto que os outros dois condutores possuem a corrente orientada negativamente, com sentido para fora da folha. A divisão e agrupamento dos condutores foram feitas automaticamente pelo software.

As propriedades dos enrolamentos de cada fase aparecem ao clicar no grupo correspondente. A Figura 31 mostra os parâmetros da fase A logo abaixo da janela “Project Manager”, porém para alterá-los é preciso clicar duas vezes no grupo escolhido. O campo “Winding Type” define o tipo de entrada de excitação, podendo ser de tensão, de corrente ou externa. A externa refere-se a um circuito de excitação externo, que pode ser configurado no próprio Maxwell pelo “Maxwell Circuit Editor” ou importado pelo Simplorer. Para a simulação das partidas com tensão plena, foi escolhido o tipo “Voltage” com valor eficaz fase-neutro de 220 V. Já na simulação das partidas com tensão reduzida foi necessária colocar uma expressão do comando “if” no campo “Voltage” ao invés de 220V, de forma a simular os chaveamentos das tensões, emulando uma contatora estrela-triângulo e uma mudança de tap do autotransformador.

O campo “IsSolid” define se os condutores em cada ranhura serão sólidos ou fios. Ao clicar em cada um dos condutores, pode-se escolher a quantidade de fios por ranhura. Para a simulação foi escolhida a opção “Strained”, que são os condutores em fios, sendo 30 fios por ranhura.

Os valores de resistência e indutância dos enrolamentos também foram preenchidos automaticamente, com base no material escolhido no RMXprt para as bobinas.

O parâmetro “EndConection” trata-se do anel condutor nas extremidades das barras do rotor e, assim como as bobinas, os valores de resistência e indutância são referentes ao material escolhido no RMXprt.

Ao clicar com o botão direito no parâmetro “Excitations”, observa-se o a opção “Set Eddy effects”, que adiciona aos condutores selecionados o efeito das correntes parasitas. Nas simulações, este parâmetro foi adicionado para todos os condutores envolvidos, ou seja, tanto nas bobinas do estator quanto nas barras do rotor.

3.2.5 - Parâmetro “Parameters”

Permite que sejam escolhidas soluções entre as grandezas força ou conjugado, selecionando a parte que deve ser analisada. Quando se atribui o parâmetro de

solução, o software calcula o valor do mesmo como parte do processo de solução. Foi escolhido soluções para o conjugado nas simulações, selecionando o rotor como parte analisada.

3.2.6 - Parâmetro Mesh Operations

Com este parâmetro é possível refinar as malhas usadas no Método dos Elementos Finitos, configurando o tamanho máximo e a quantidade dos elementos em determinada parte do modelo, dentre outras opções. O software automaticamente definiu uma precisão maior para os enrolamentos do estator e barras do rotor com um tamanho máximo por elemento de 2,9 mm e 2,5 mm, respectivamente. Já para o restante foi definido um tamanho máximo de 6,27 mm.

3.2.7 - Parâmetro “Analysis”

Assim como no RMxpert, é preciso adicionar um análise procedendo da mesma maneira antes de iniciar a simulação. Clicando com o botão direito em “Analysis” e em seguida escolhendo a opção “Add Solution Setup”, uma janela de configuração aparece, conforme Figura 32.

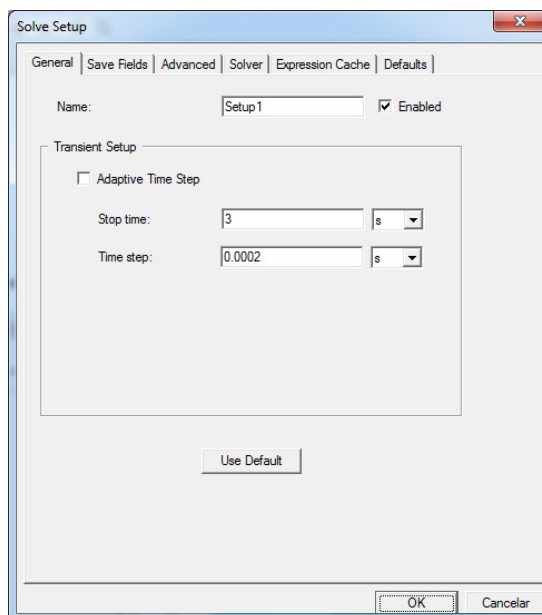


Figura 32: Janela de configuração do Solution Setup – aba General.

Nota-se que, mais uma vez, há uma divisão em abas, as quais apenas as duas primeiras foram configuradas, e as demais permaneceram na configuração padrão.

Na aba “General”, além do nome do “solution setup”, deve-se definir o tempo de simulação e o passo de integração. O tempo de simulação escolhido foi de 3 s, pois é tempo suficiente para que os motores simulados entrassem em regime permanente. O passo de integração foi de 200 μ s, a fim de obter uma boa precisão nos gráficos resultantes.

Na aba “Save Fields”, deve-se definir quais os instantes de tempo que terão a distribuição dos campos e fluxos eletromagnéticos e das correntes armazenados. Como a simulação com o passo de integração pequeno demora algumas horas, foram escolhidos instantes a cada 5 ms para armazenamento das informações, a fim de obter uma boa gama de distribuições para apresentação daqueles mais interessantes. Os detalhes desta aba são mostrados na Figura 33.

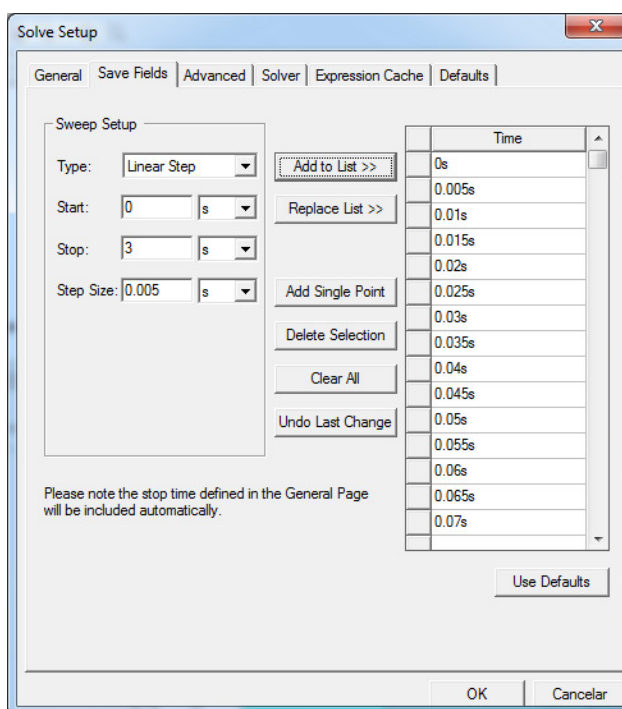


Figura 33: Janela de configuração do Solution Setup – aba Save Fields.

Após a criação do “*Solution Setup*”, deve-se proceder da mesma maneira feita no RMXprt antes de iniciar a análise. É preciso validar o modelo, clicando em Maxwell 2D na barra de ferramentas e, em seguida, em “Validation Check”. Se o modelo não contiver erros, deve-se clicar novamente em Maxwell 2D e, em seguida, em “Analyse All”.

3.2.8 - Parâmetro “Optimetrics”

Parâmetro usado para otimização e refino de modelos. O Optimetrics permite que um modelo original tenha parâmetros deste que possam variar, possibilitando a

comparação entre eles. As variações podem, inclusive, ser geométrica e, portanto, este recurso poderia ter sido usado para a simulação dos três modelos realizados. Porém, devido ao fato de requerer alguns comandos consideravelmente mais rebuscados e complexos e as alterações estudadas se limitarem à ranhura dos motores, optou-se por criar três arquivos diferentes para cada modelo.

3.2.9 - “Results”

Este recurso já foi comentado no RMxpert e no Maxwell ele possui exatamente os mesmos comandos e opções de resultados das simulações. Os seguintes gráficos 2D retangulares foram criados: Torque x Tempo, Velocidade x Tempo, Correntes no Estator x Tempo e Torque x Velocidade.

3.2.10 - “Fields Overlay”

O Maxwell permite que sejam plotados diversos tipos de campos e fluxos no modelo, além da malha usada no MEF. Há a opção entre a magnitude da grandeza e, para o caso de grandezas vetoriais, os vetores ao longo do modelo. Para modelos 2D, a visualização das plotagens vetoriais fica prejudicada, pois ela possui três dimensões, portanto, foram usados apenas a opção de magnitude das grandezas.

Para criar uma plotagem, é preciso selecionar a parte do modelo que se deseja inseri-la e clicar com o botão direito na mesma. Um menu aparece, conforme mostra a Figura 34.

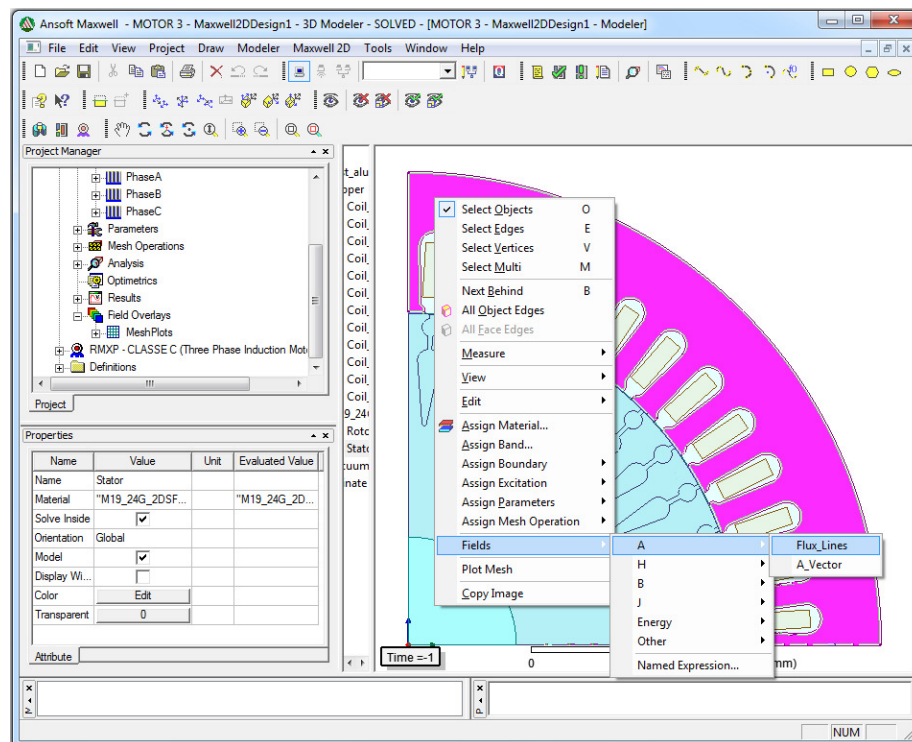


Figura 34: Plotagem dos campos.

No menu, deve-se escolher a opção “Fields” para que apareçam as opções de campo. Como exemplo, foi selecionado o campo magnético na opção de linhas de fluxo. Ao selecionar o item desejado, aparece a janela de configuração do campo, conforme a Figura 35.

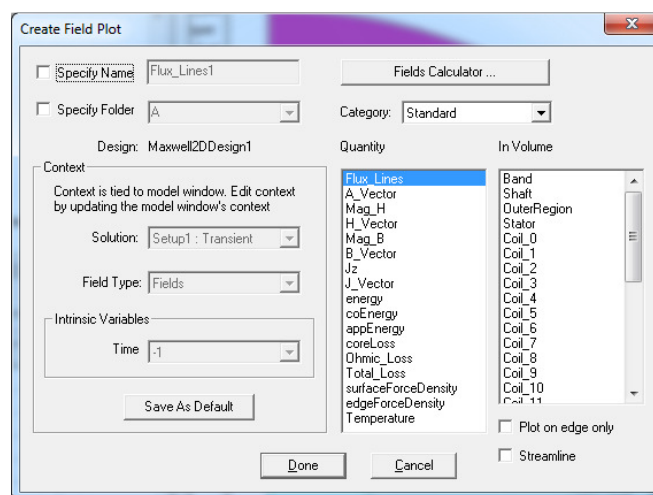


Figura 35: Configuração do campo escolhido.

Nesta janela, define-se novamente o tipo de campo em “Quantity” e a área que ele aparecerá em “In Volume”. Para a apresentação dos resultados, foram criados a plotagem das linhas de fluxo de campo magnético em todo o motor e a distribuição de corrente nas barras do rotor. Entretanto, para exemplificar os passos, apenas as linhas de fluxo magnético no estator são mostradas nesta etapa, selecionando “Flux_Lines” em

“Quantity” e “Stator” em “In Volume”. O campo só pode ser plotado após a realização da simulação. Portanto, o próximo passo deve ser clicar em “Maxwell 2D” e, em seguida, em “Analyse All”.

Após o término da simulação, deve-se escolher o instante de tempo dentre os escolhidos em “Save Fields”, na seção “Parâmetro Analysis”, clicando em “View”, na barra de ferramentas e, escolhendo a opção “Set Solution Context”. A janela que aparece é mostrada na Figura 36.

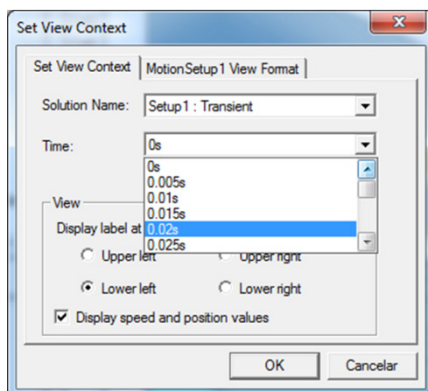


Figura 36: Seleção do instante a ser visualizado.

Os instantes de tempo salvos aparecem na lista do campo “Time”. Após a escolha do instante desejado deve-se clicar no botão OK para que seja aplicado ao modelo. Com isso, resta selecionar o campo criado, que fica agrupado no item “Fields Overlays”, clicar com o botão direito e, em seguida, na opção “Set Context to Active Window”. O exemplo criado é mostrado na Figura 37.

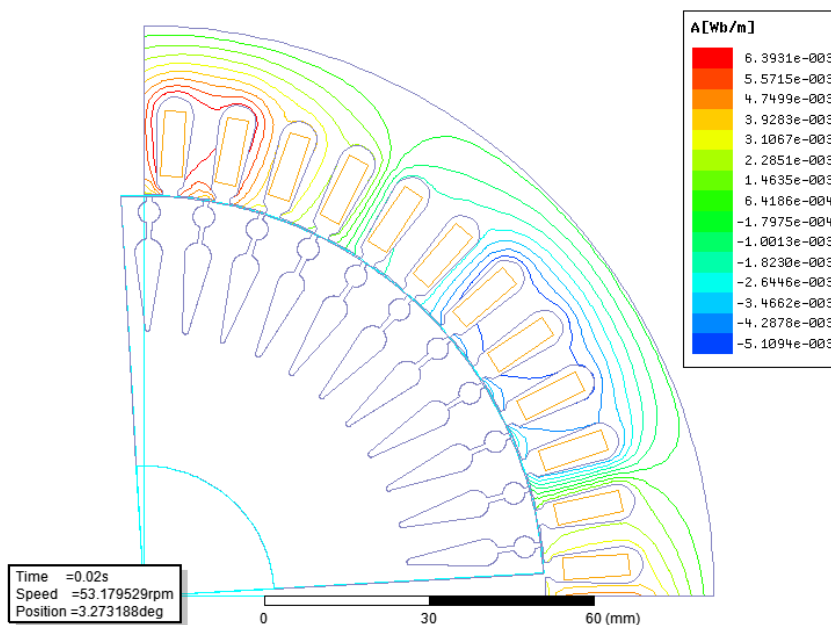


Figura 37: Linhas de fluxo magnético no estator.

Para as malhas do MEF, deve-se proceder de maneira semelhante, selecionando a parte que se deseja plotar a malha, clicar com o botão direito e

escolher a opção “Plot Mesh”, que fica logo abaixo da opção “Fields”, mostrado na Figura 34. O resultado é mostrado na Figura 38.

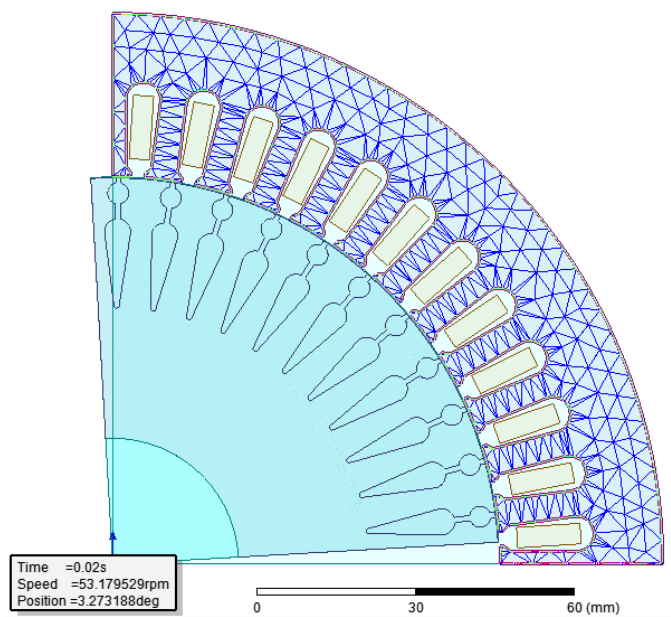


Figura 38: Plotagem da malha do MEF no estator.

Capítulo 4 - Simulações e resultados

Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos com as simulações dos softwares do pacote da Ansoft. Três motores foram modelados, um com comportamento próximo das classes A e B, um com resultado próximo da classe C e outro próximo à classe D. Nas três simulações foram mantidos a potência nominal, tensão de excitação, frequência e os aspectos construtivos do estator, de forma que as três máquinas difiram apenas pelas ranhuras do rotor.

A Figura 39 mostra as características do estator:

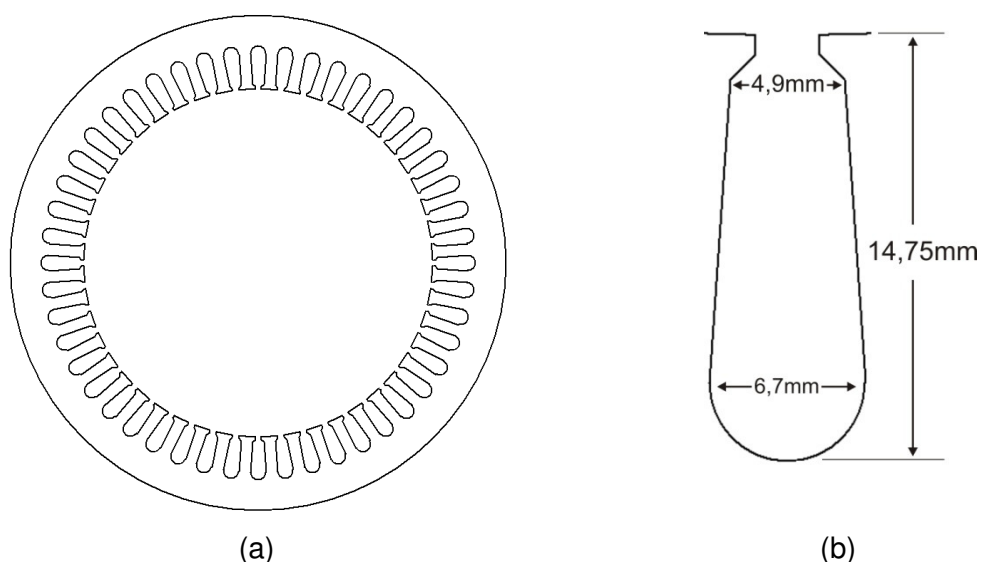


Figura 39: (a) Vista geral do estator usado nas simulações. (b) Detalhes da ranhura do estator.

Os parâmetros das máquinas usados nas simulações foi potência de 3700W, tensão de excitação de 380 V entre fases, frequência de 60 Hz, 8 polos e ligação das bobinas do estator em estrela. Os motores tem um estator com 210 mm de diâmetro externo e 148 mm de diâmetro interno, e o gap entre o estator e o rotor é de 0,7 mm.

4.1 - Resultados RMxprt

A seguir são mostrados os resultados obtidos pelo RMxprt:

4.1.1 - Motor 1: Classe A e B

O primeiro motor simulado tem características entre as classes A e B, com ranhuras consideravelmente largas e não tão profundas. A visão frontal do rotor e o detalhe de sua ranhura são mostrados na Figura 40.

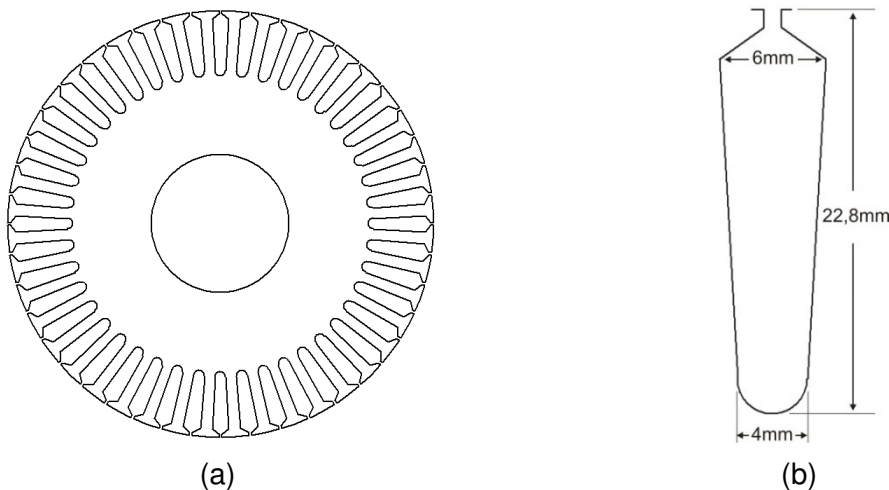


Figura 40: (a) Vista geral do rotor do primeiro rotor. (b) Detalhes da ranhura do rotor do motor 1.

A característica de conjugado x velocidade do primeiro motor é mostrada na Figura 41. Pode-se notar que este motor possui conjugado máximo próximo da velocidade nominal, ou seja, trabalha com baixo escorregamento. Além disso, como o torque máximo é aproximadamente 300% maior que o de partida, característica esperada nos motores de classe A e B.

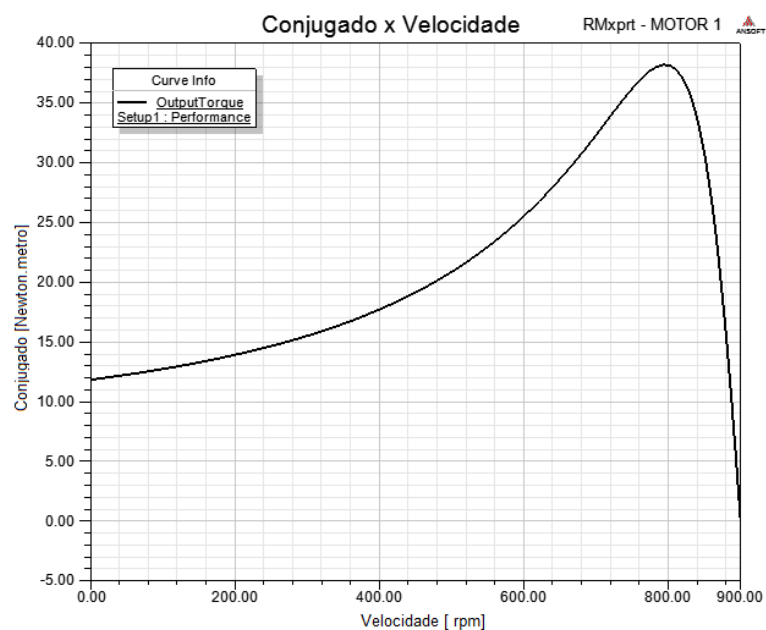


Figura 41: Característica conjugado x velocidade do primeiro motor.

Segundo [5], o ponto de operação do motor está contido na região linear de baixo escorregamento da curva conjugado x velocidade. Portanto, o ponto de operação deste motor está aproximadamente entre 850 e a velocidade síncrona.

O gráfico da corrente de armadura em relação à variação de velocidade é mostrado na Figura 42.

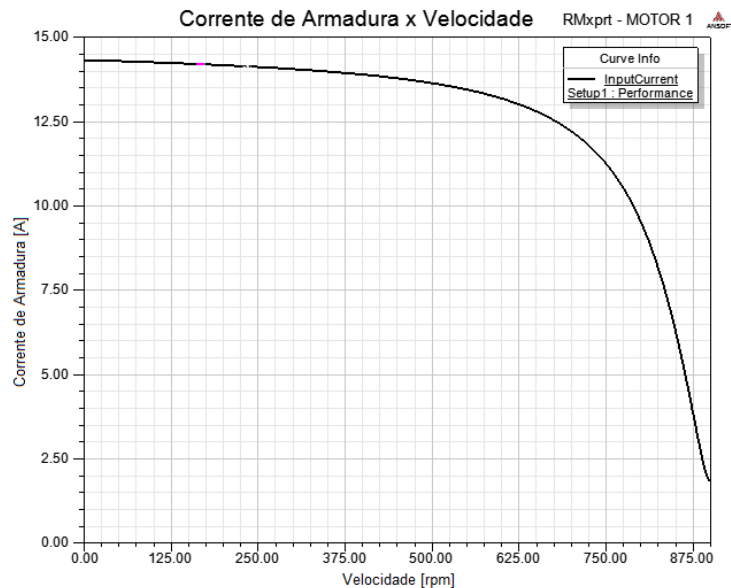


Figura 42: Variação da corrente em relação à velocidade – Motor 1.

Observa-se uma corrente de partida relativamente alta, próxima dos 14 A e que começa a cair bruscamente após o motor atingir uma velocidade próxima dos 700 rpm.

4.1.2 - Motor 2: Classe D

O segundo motor simulado possui características próximas aos de classe D, com ranhuras pequenas e próximas à superfície, conforme pode ser visto na Figura 43.

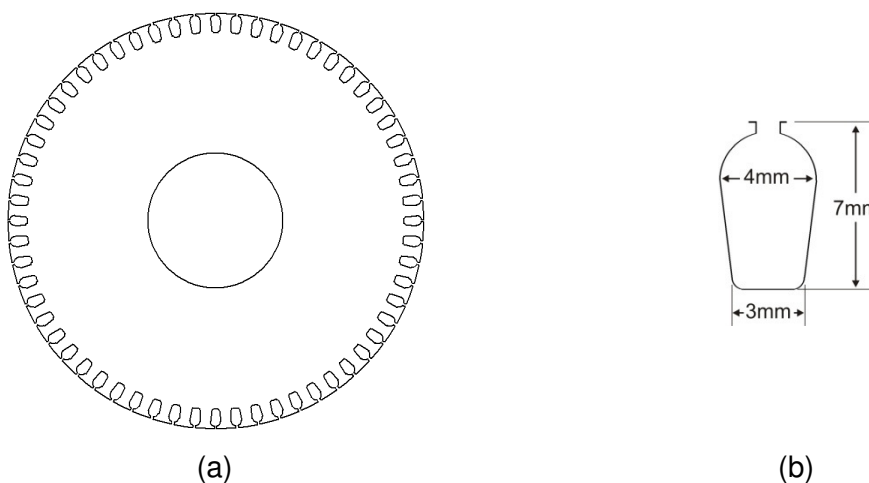


Figura 43: (a) Vista geral do rotor do segundo motor. (b) Detalhes da ranhura do rotor do motor 2.

A característica conjugado x velocidade deste motor é mostrada na Figura 44.

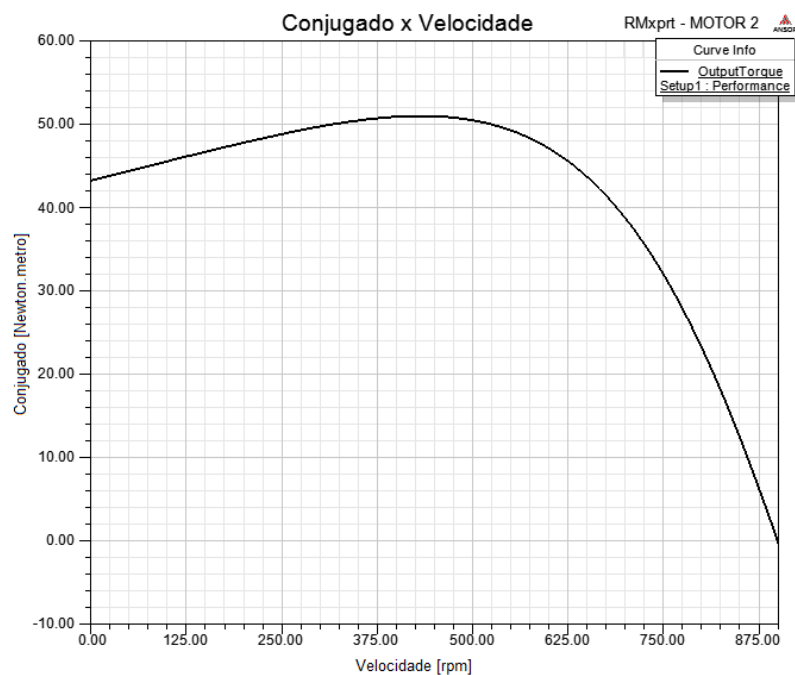


Figura 44: Característica conjugado x velocidade do segundo motor.

Nota-se que, assim como os motores de classe D, o segundo motor possui um alto conjugado de partida, com conjugado máximo longe da velocidade síncrona. A corrente de armadura em relação à velocidade é mostrada na Figura 45.

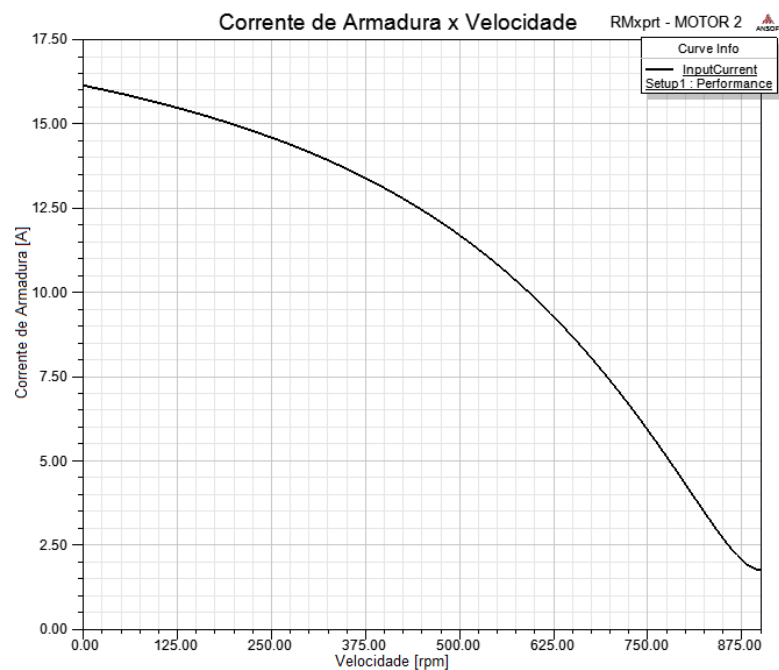


Figura 45: Variação da corrente em relação à velocidade – Motor 2.

Como era de se esperar, a corrente deste motor cai rapidamente com a variação da velocidade, típico de um motor classe D.

4.1.3 - Motor 3: Classe C

O último motor simulado possui características de um motor classe C, com um rotor de gaiola dupla. Os detalhes e vista frontal de seu rotor são mostrados na Figura 46.

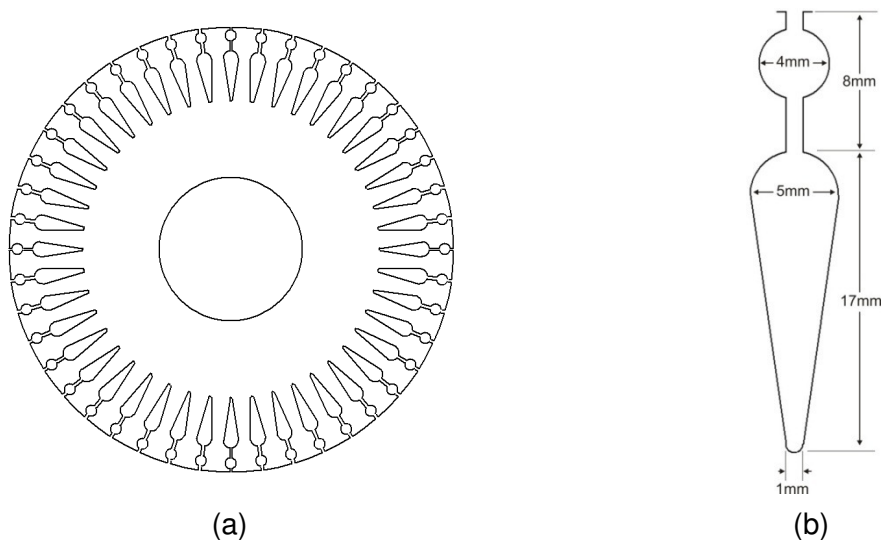


Figura 46: (a) Vista geral do rotor do terceiro motor. (b) Detalhes da ranhura do rotor do motor 3.

A característica conjugado x velocidade é mostrada na Figura 47.

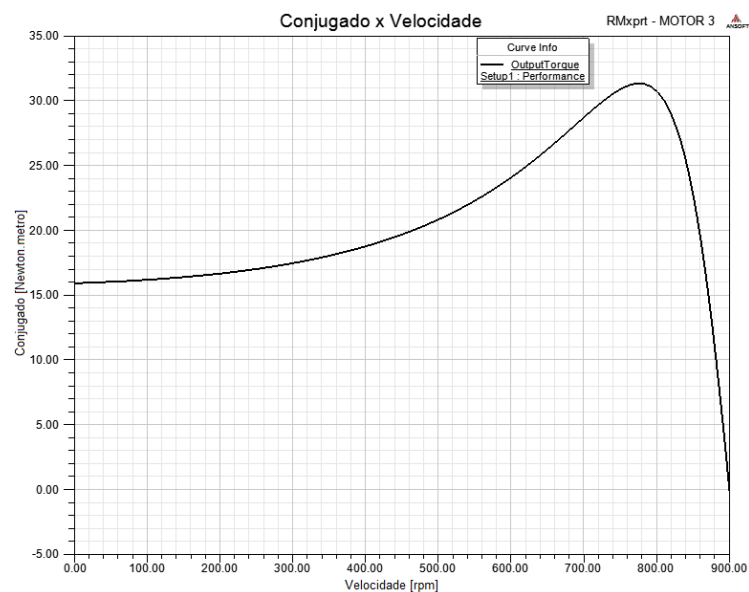


Figura 47: Variação da corrente em relação à velocidade – Motor 3

Pode-se notar um bom torque de partida, e conjugado máximo com velocidade próxima à síncrona, característico dos motores de classe C. Pelos mesmos motivos citados na análise da corrente de armadura x velocidade do motor 1, o ponto de operação está na faixa entre 840 rpm e a velocidade síncrona.

A corrente de armadura em relação à variação de velocidade é mostrada na Figura 48.

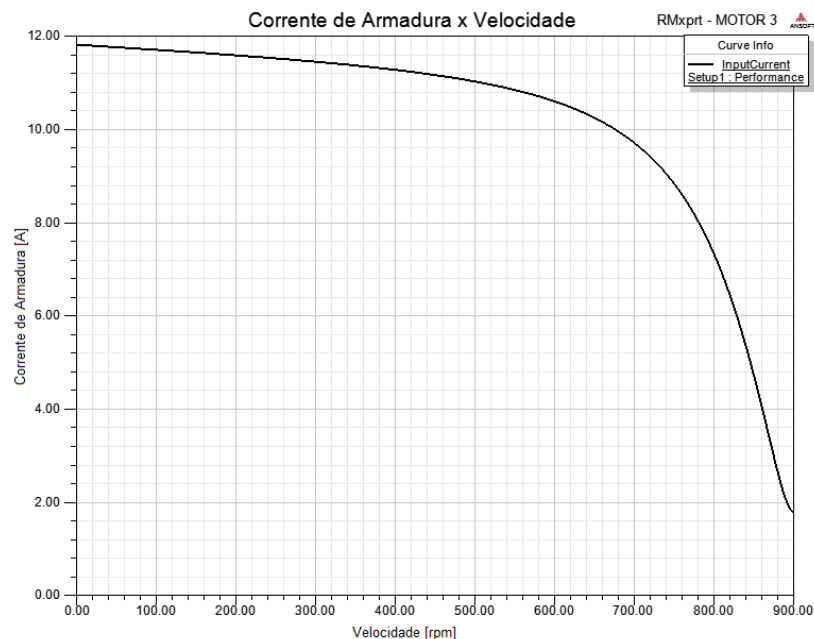


Figura 48: Variação da corrente em relação à velocidade – Motor 3.

O resultado do comportamento de sua corrente de armadura também era esperado, já que os motores de classe C possuem baixa corrente de partida.

4.1.4 - Comparação entre os modelos

Para uma melhor análise sobre a diferença entre os modelos, as características conjugado x velocidade e corrente de armadura x velocidade de cada um foram plotados juntos, conforme Figura 49 e Figura 50. Dessa forma é possível notar a diferença de comportamento com a mudança das ranhuras do rotor, tanto na partida quanto com o desenvolvimento da velocidade do conjugado e da corrente de armadura.

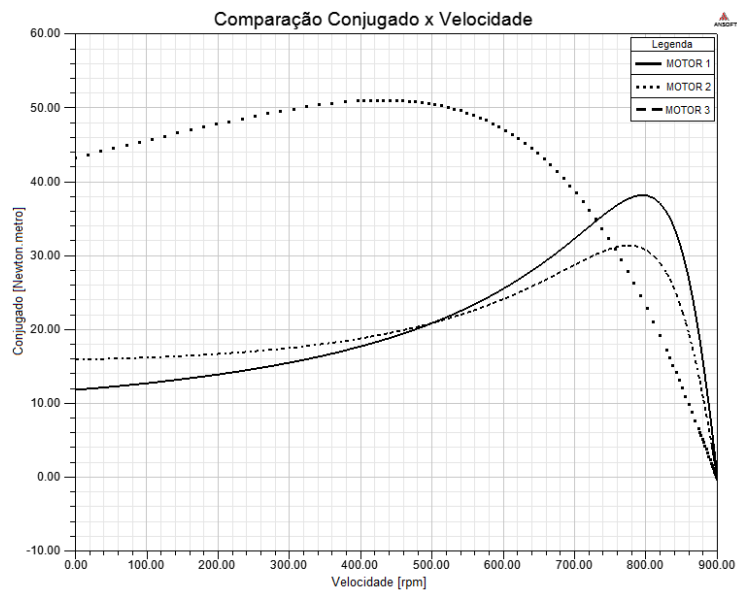


Figura 49: Comparação da característica Conjuguado x Velocidade dos três motores.

Na Figura 49 nota-se o quanto o conjugado de partida é maior do segundo motor em relação aos outros dois. As barras próximas à superfície diminuem o fluxo de dispersão, o que aumenta o conjugado máximo. Além disso, a resistência elevada devido ao tamanho das barras traz o ponto de conjugado máximo mais próximo da partida.

É possível observar também, o ganho de torque na partida do motor 3 em relação ao motor 1. A gaiola dupla do terceiro motor aumenta a resistência no rotor e aumenta seu conjugado de partida. Por outro lado, pode-se notar que, devido à reatância de dispersão do terceiro motor ser maior que a do primeiro, o conjugado máximo do motor 3 é menor.

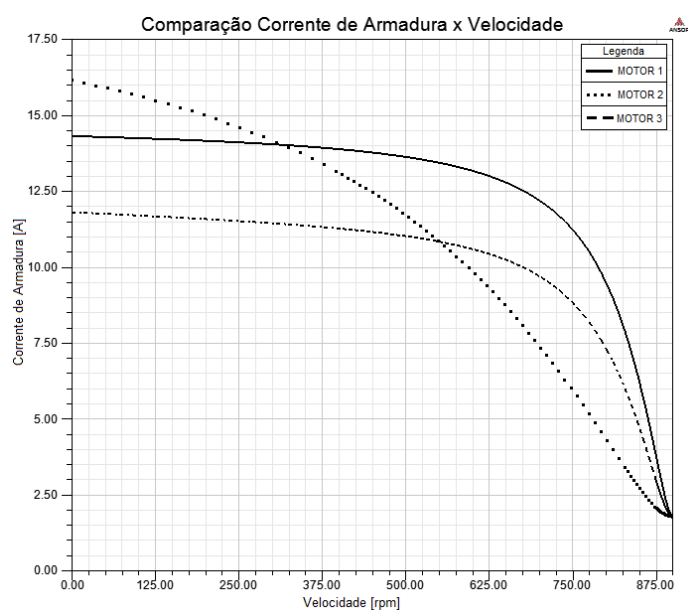


Figura 50: Comparação da Corrente de Armadura x Velocidade dos três motores.

A comparação das correntes de armadura dos motores, mostrados na Figura 50, deixa evidente o quanto é menor a corrente de partida do terceiro motor em relação aos demais.

4.2 - Resultados Maxwell 2D

As simulações realizadas no Maxwell 2D tiveram um tempo de 3 s, com o motor partindo com um conjugado constante de 15 Newton.metro. A seguir são mostrados os resultados individuais obtidos dos motores.

4.2.1 - Motor 1: Classe A e B

Na Figura 51, é mostrado o comportamento transitório de partida. Pode-se observar que ao final da simulação o motor estabiliza próximo da velocidade síncrona, 900 rpm para este caso.

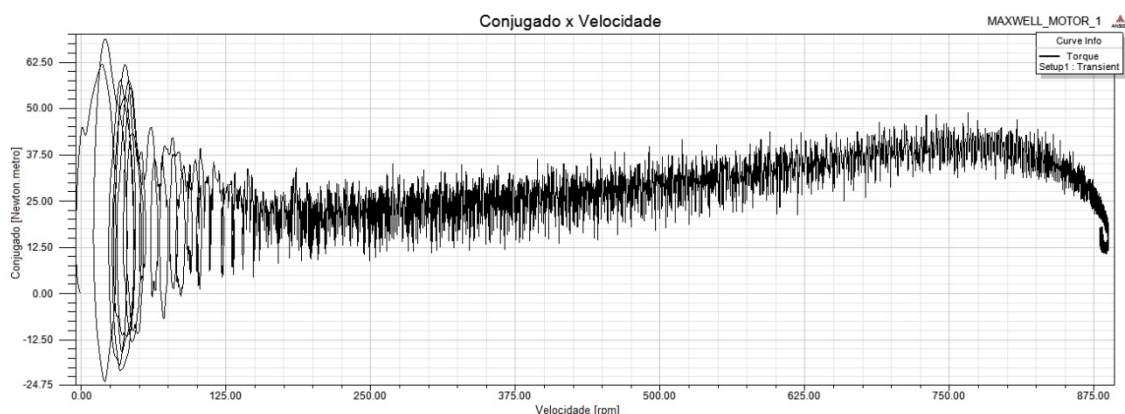


Figura 51: Gráfico Conjugado x velocidade do motor 1.

Observa-se uma grande oscilação na partida que vai ficando cada vez menor quando se aproxima da velocidade síncrona. O ponto no final da curva é alcançado quando se estabelece o regime permanente, próximo de uma velocidade de 875rpm. Este ponto está de acordo com a característica conjugado x velocidade apresentada na Figura 41.

A Figura 52, mostra a velocidade ao longo do tempo. Neste gráfico é possível observar que a velocidade estabiliza logo acima de 875 rpm.

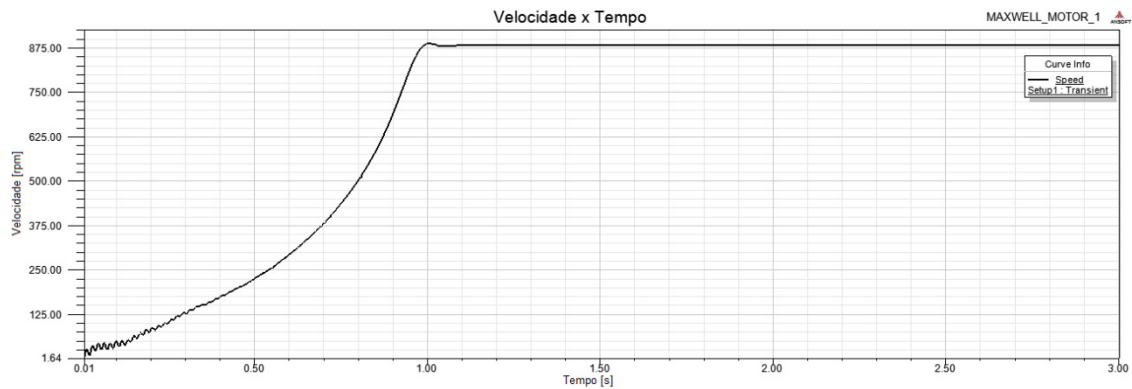


Figura 52: Gráfico da velocidade no tempo do motor 1.

Na Figura 53 o conjugado é mostrado ao longo do tempo, e pode-se notar um pico na partida, seguido de um aumento gradativo correspondente à aceleração do motor. Em torno do instante de 1 s o conjugado diminui, pois é o momento que o motor entra em regime permanente, com velocidade próxima da síncrona. Como esperado, em regime permanente, o conjugado oscila em torno do valor de carga, 15 Newton.metro.

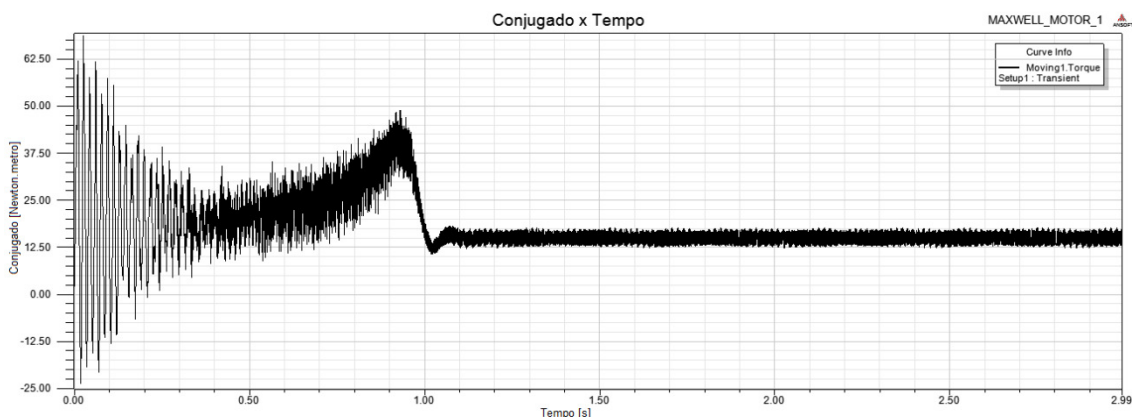


Figura 53: Gráfico do conjugado pelo tempo do motor 1.

A corrente de armadura da fase A é mostrada na Figura 54. Observa-se que quando se aproxima do instante que o motor entra em regime permanente, há uma diminuição gradativa da corrente de armadura. No período de 0s a 0,8 s, correspondente à aceleração do motor, o valor eficaz calculado pelo software é de 16,9 A, enquanto que em regime permanente, o valor eficaz é de 3,0 A. Ou seja, na partida, o motor 1 possui uma corrente aproximadamente 5,6 vezes maior que a de regime permanente para a carga especificada.

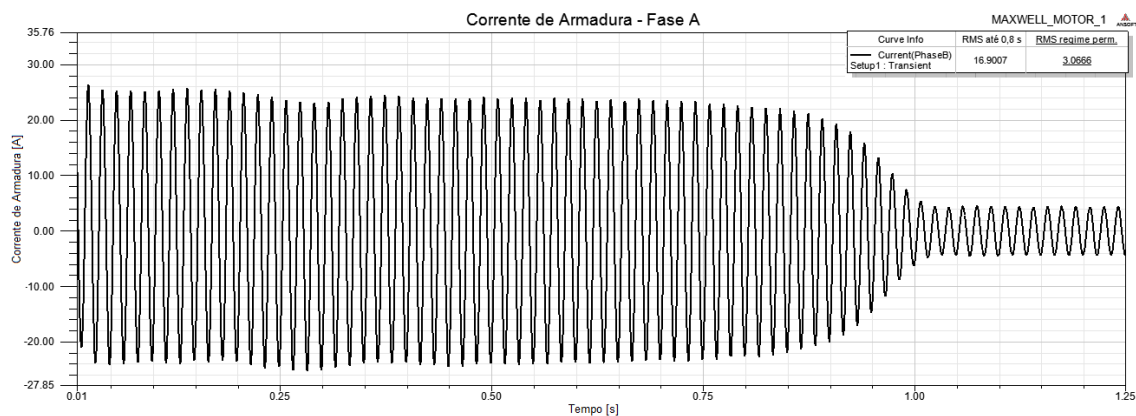


Figura 54: Corrente de armadura da fase A – Motor 1.

A seguir é mostrada a distribuição de corrente nas barras do rotor e as linhas de fluxo magnético do primeiro motor em diferentes instantes de tempo.

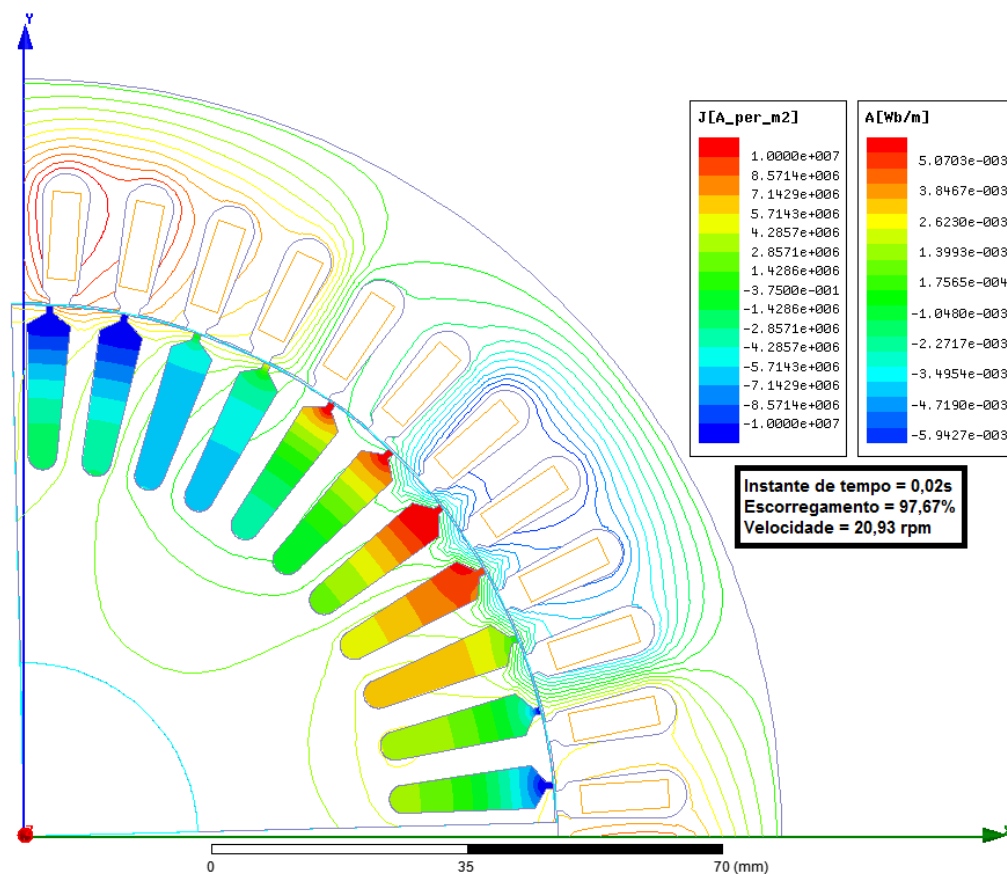


Figura 55: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento de 97,67%.

O instante de tempo mostrado na Figura 55 é de 0,02 s, ou seja, logo na partida. Nota-se a concentração de corrente na superfície, principalmente nas barras na direção dos polos. Isto era de se esperar, pois o primeiro motor possui barras um pouco mais profundas que os de classe A, suficientes para criar uma diferença de

reatância entre a parte próxima a superfície e a parte mais próxima do centro do rotor, e assim, criando concentração de corrente diferente ao logo das mesmas. Além disso, é possível ver que neste instante há poucas linhas de fluxo magnético no rotor, pois, como a corrente nas barras é alta na partida, o campo magnético gerado em oposição ao campo do estator reduz o fluxo magnético resultante no rotor.

A Figura 56 mostra o instante de tempo de 0,92 s, com a velocidade já mais próxima da síncrona e escorregamento de 19,56%.

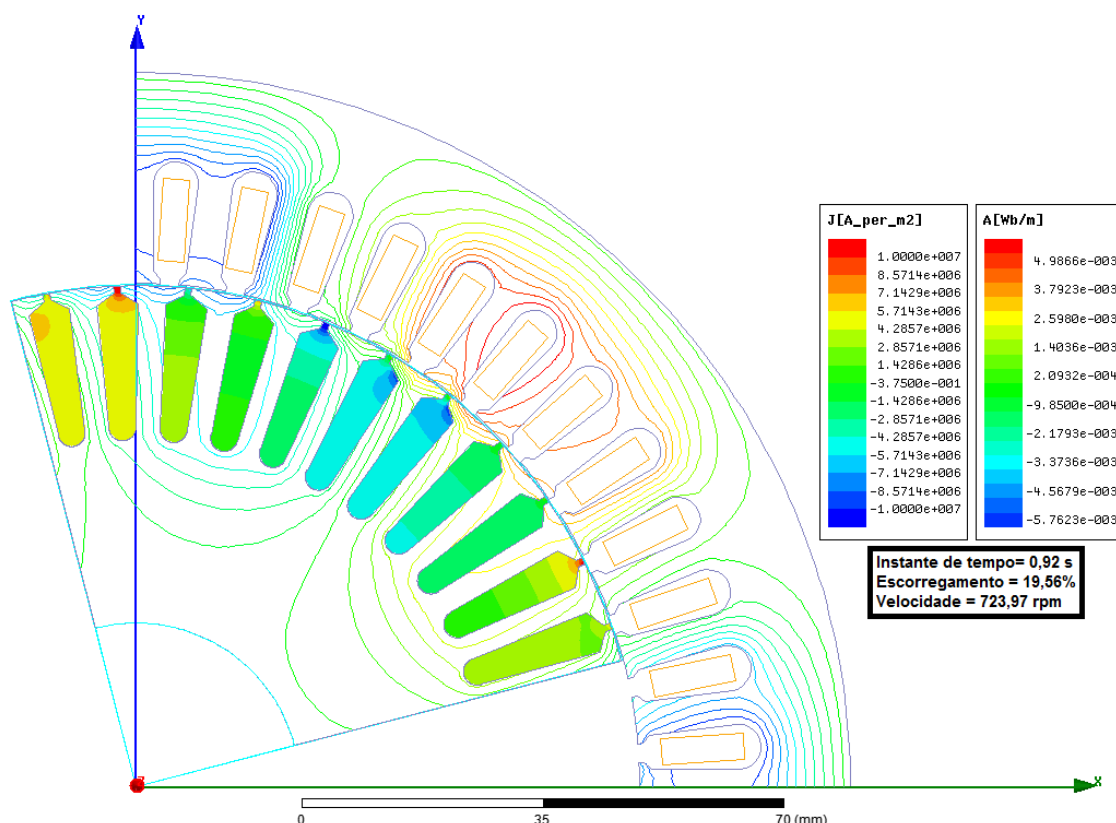


Figura 56: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento 19,56%.

É possível notar que com a diminuição do escorregamento a densidade de corrente na barra fica mais uniforme e os pontos de concentração diminuem. Isso se dá devido ao fato da diferença de reatância ao longo da barra ficar cada vez menor com a diminuição do escorregamento e consequentemente da frequência. No instante mostrado, é possível observar mais linhas de fluxo se formando no rotor, pois a corrente nas barras começa a diminuir e o campo em oposição ao do estator também diminui.

A Figura 57 mostra o motor no fim da simulação, com velocidade muito próxima da síncrona e um baixo escorregamento. É interessante ver a grande diferença das linhas de fluxo deste instante em relação aos anteriores. Em regime permanente, a corrente do rotor atinge níveis mais baixos e, consequentemente, o campo oposto ao

campo do estator diminui, fazendo com as linhas de fluxo do estator se distribuam uniformemente também no rotor.

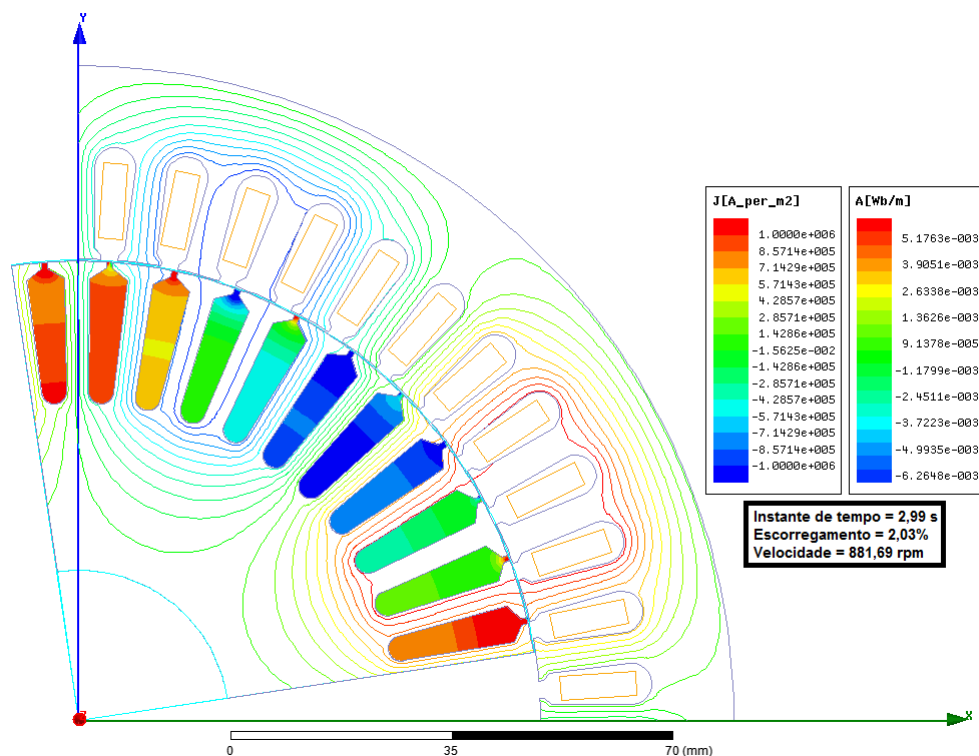


Figura 57:Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento de 2,03%.

A distribuição de corrente neste momento é bem uniforme. As barras que estão na direção dos polos possuem valores de corrente maiores do que aquelas que estão na transição entre polo sul e polo norte.

4.2.2 - Motor 2: Classe D

Seguindo a mesma ordem dos resultados do motor 1, a Figura 58 mostra a característica conjugado x velocidade do segundo motor obtido na simulação do Maxwell 2D.

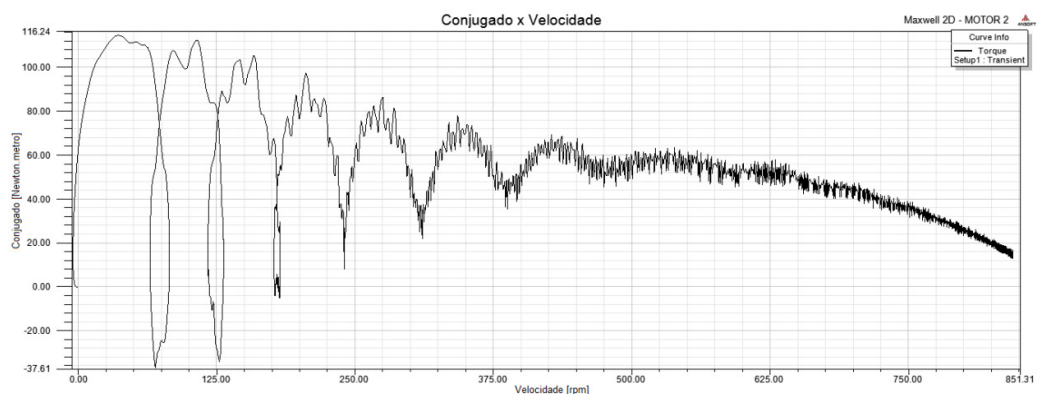


Figura 58:Gráfico Conjugado x velocidade do motor 2.

A característica dessa curva confere com a obtida analiticamente pelo RMxpert. Uma alta aceleração do motor é notada com clareza na Figura 59.

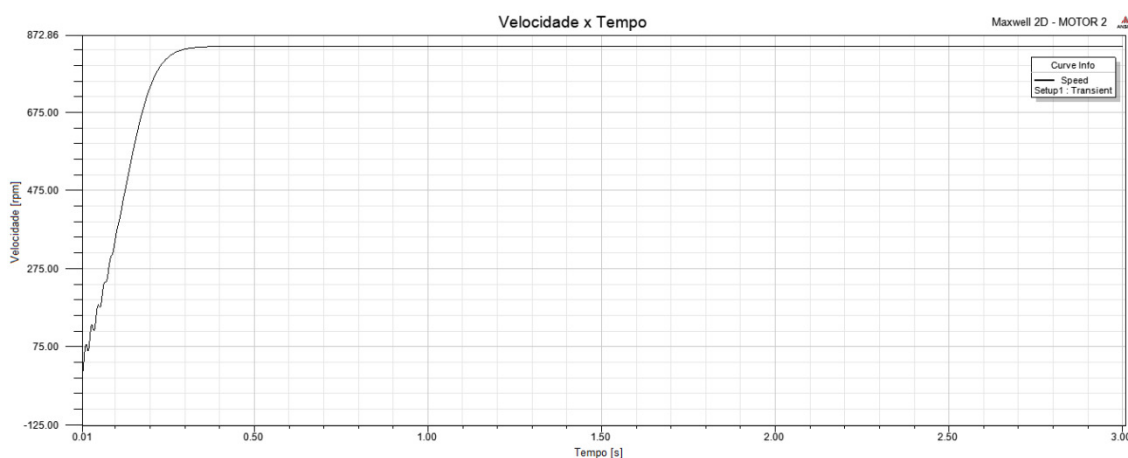


Figura 59: Gráfico da velocidade no tempo do motor 2.

Pode-se notar que este motor atinge o regime permanente por volta dos 0,3 s, o que confirma o alto torque de partida e justificam as aplicações as quais os motores de classe D são destinados. A variação do conjugado ao longo do tempo é mostrada na Figura 60.

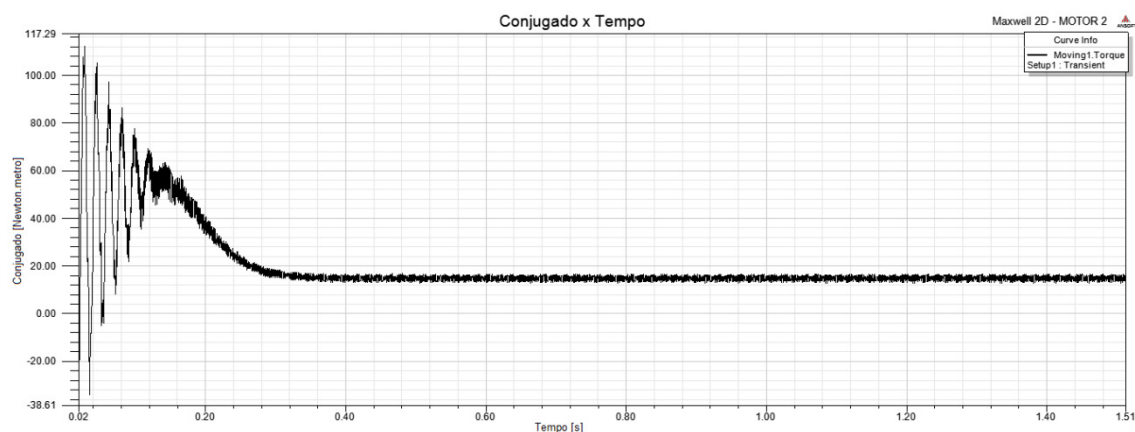


Figura 60: Gráfico do conjugado pelo tempo do motor 2.

O resultado coincide com o esperado, já que o segundo motor foi modelado de forma a obter comportamento semelhante aos de classe D. A corrente de armadura ao longo do tempo é mostrada na Figura 61.

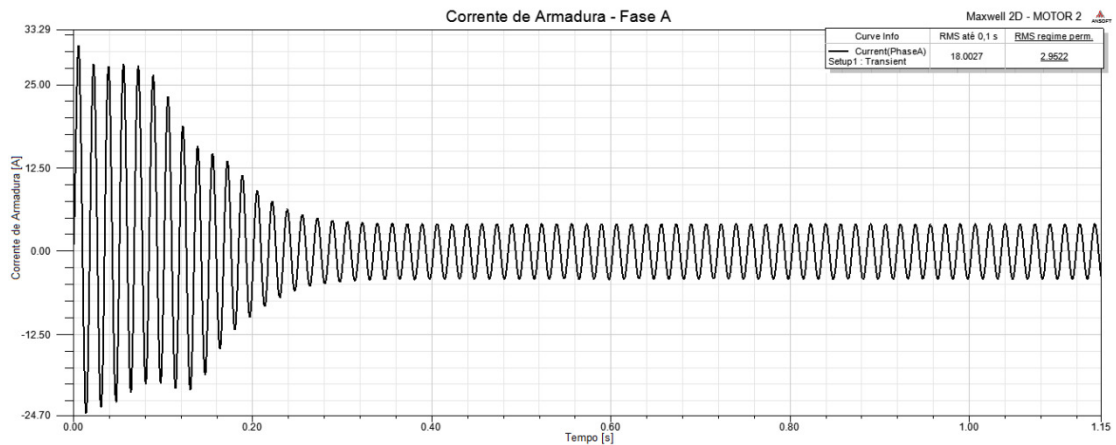


Figura 61: Corrente de armadura da fase A – Motor 2.

O valor eficaz da corrente durante o transitório, imediatamente antes de começar a decair, em 0,1 s, é de aproximadamente 18 A. Conforme obtido pelo RMxpert, a corrente de partida do motor 2 se mostrou maior que a do primeiro motor. A proporção do valor eficaz do período transitório e do regime permanente também foi aproximadamente de 6 vezes.

Conforme apresentado para o primeiro motor, a seguir, são apresentadas as densidades de corrente e linhas de fluxo magnético em diferentes instantes da simulação do motor 2. O primeiro instante, a 0,02 s da partida, é mostrado na Figura 62.

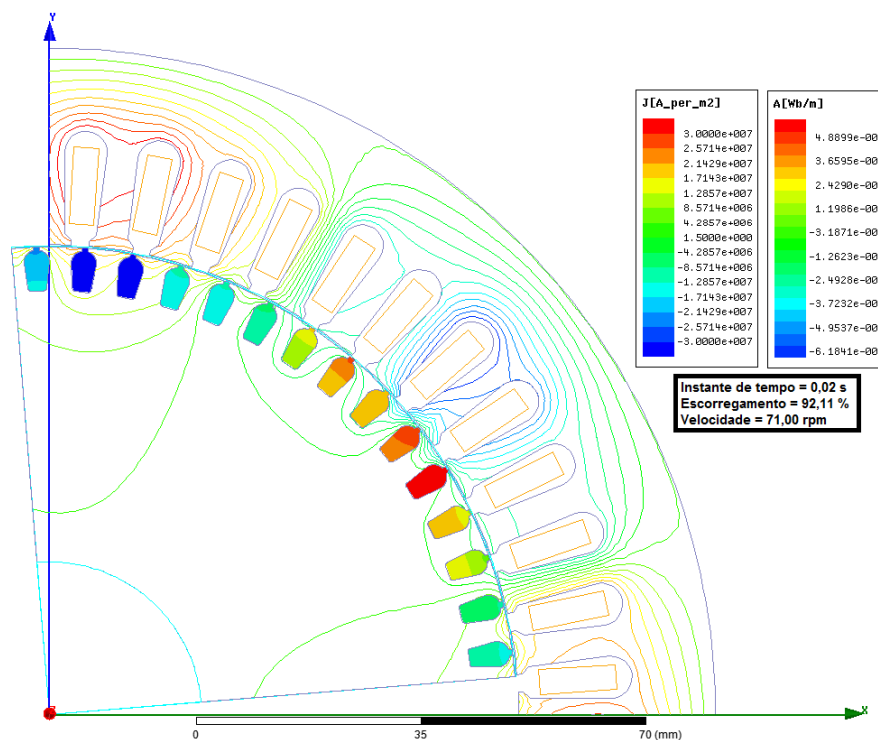


Figura 62: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento de 92,11%.

Pode-se notar que mesmo na partida, o motor 2 não possui grandes diferenças de densidade de corrente ao longo da barra. Por outro lado, assim como no primeiro motor, neste instante as linhas de fluxo magnético no rotor ainda são poucas, como era de se esperar devido ao campo em oposição criado pelas altas correntes do rotor.

O instante a seguir, mostrado na Figura 63, ocorre 100 ms antes do motor atingir o regime permanente.

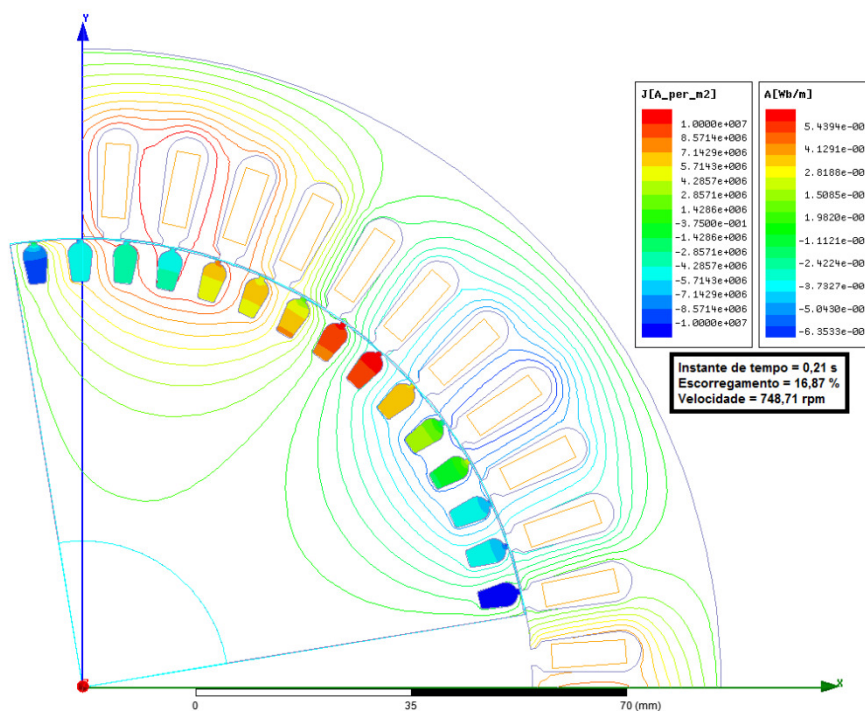


Figura 63: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento de 16,87%.

Nota-se que a densidade de corrente nas barras pouco mudou. Este resultado já era esperado, visto que com as barras próximas à superfície, a reatância de dispersão diminui. Consequentemente, a reatância ao longo da barra praticamente não muda, fazendo a corrente se distribuir uniformemente por toda a barra.

Por último, é mostrado o final da simulação, no instante 3 s, conforme Figura 64. Neste instante, o motor já está em regime permanente e com uma velocidade de 844 rpm, sendo evidente o alto escorregamento deste modelo, comportamento típico dos motores de classe D. Além disso, é possível observar que os polos no rotor estão bem definidos.

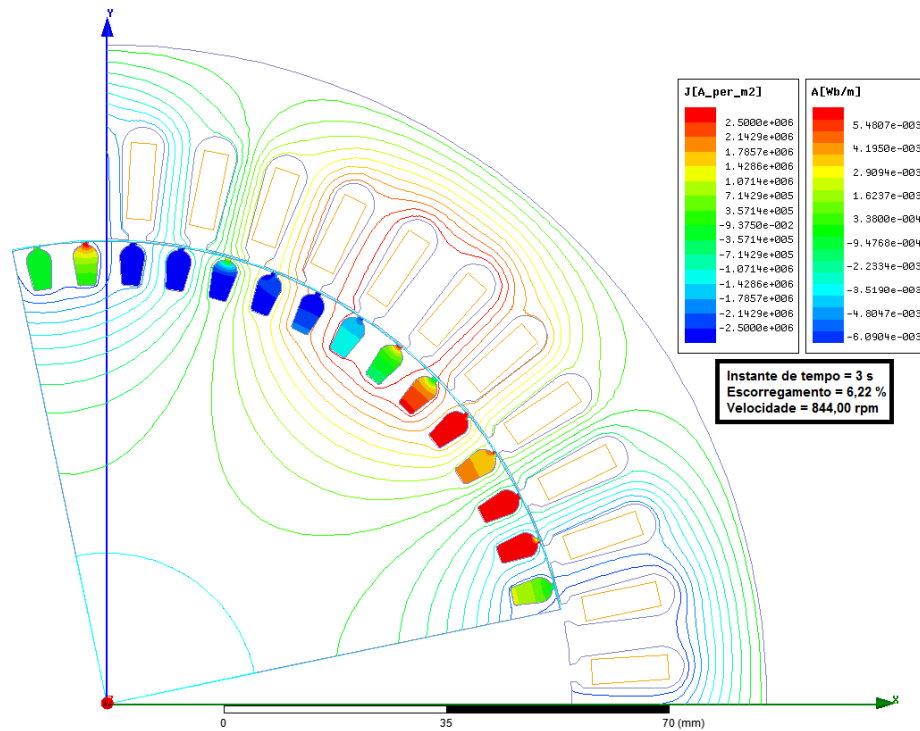


Figura 64: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento de 6,22%.

4.2.3 - Motor 3: Classe C

Assim como nos modelos anteriores, os resultados da simulação do Maxwell 2D para o terceiro motor começam pelo gráfico do conjugado x velocidade de sua partida com 15 Newton.metro de carga até o regime permanente. A Figura 65 mostra como se deu essa relação durante a simulação.

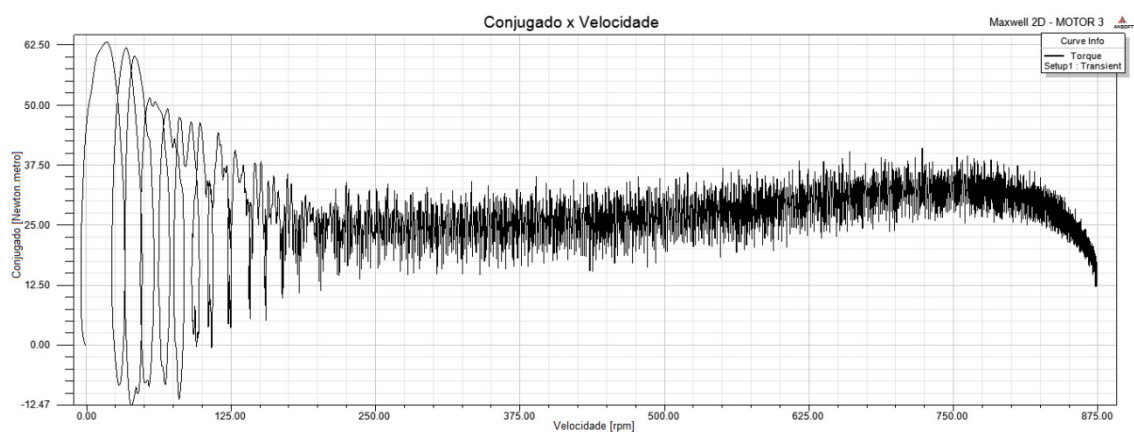


Figura 65: Gráfico Conjugado x velocidade do motor 3.

Nota-se que a velocidade deste motor oscila muito menos na partida que no primeiro motor. Além disso, fica evidente que o ponto de torque máximo, próximo da

velocidade síncrona, é menor que a obtida no primeiro motor, diferença semelhante à obtida nas curvas analíticas de conjugado x velocidade do RMxprt. O escorregamento, apesar de ser menor do que o segundo motor, é um pouco maior que o motor 1. Este resultado é condizente com o teórico, já que os motores de classe C possuem escorregamento maior que os de classe A e B e menor que os de classe D. Pode-se notar que o terceiro motor entra em regime permanente numa velocidade um pouco abaixo dos 875 rpm, o que fica mais evidente na Figura 66.

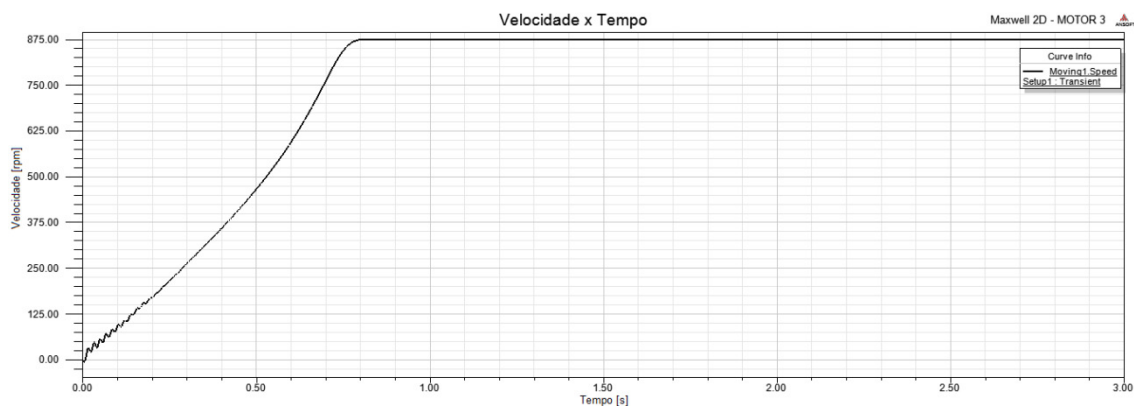


Figura 66: Gráfico da velocidade no tempo do motor 3.

O gráfico conjugado x tempo é mostrado na Figura 67. Assim como nos modelos anteriores, nota-se uma grande oscilação nos primeiros milissegundos, seguido de um aumento gradual com uma oscilação menor até o instante que o motor atinge a velocidade de regime permanente. Após isso, há uma diminuição do torque e uma oscilação pequena em torno do valor da carga.

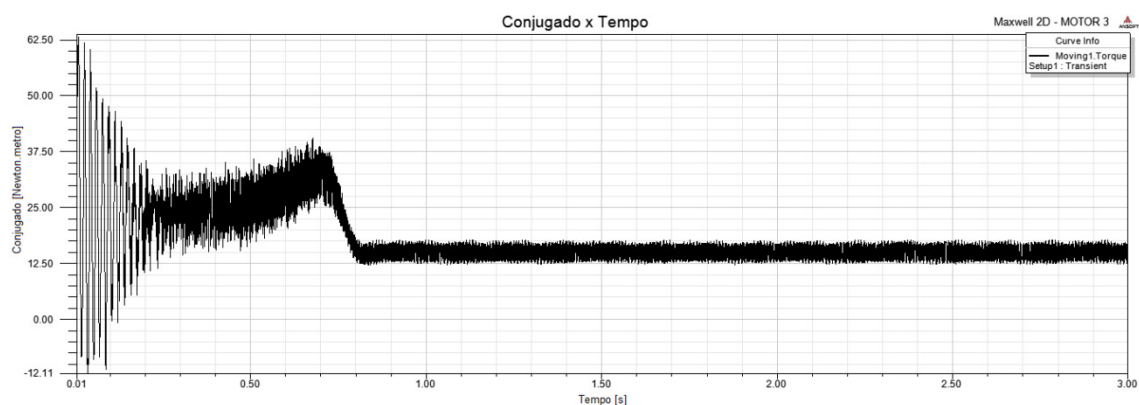


Figura 67: Gráfico do conjugado pelo tempo do motor 3.

A corrente de armadura do terceiro motor durante a simulação é mostrada na Figura 68. O valor eficaz calculado pelo Maxwell 2D até o instante em que o valor da corrente começa a cair, em 0,5s, é de 13,1 A, que, como era de se esperar, representa uma corrente de partida baixa em relação aos motores anteriores. O valor eficaz de

regime permanente é de 3,13 A, mostrando que dentre os motores modelados, o terceiro motor possui a melhor relação entre a corrente de partida e a de regime permanente para a carga especificada, cerca de 4 vezes, contra 6 vezes dos outros motores.

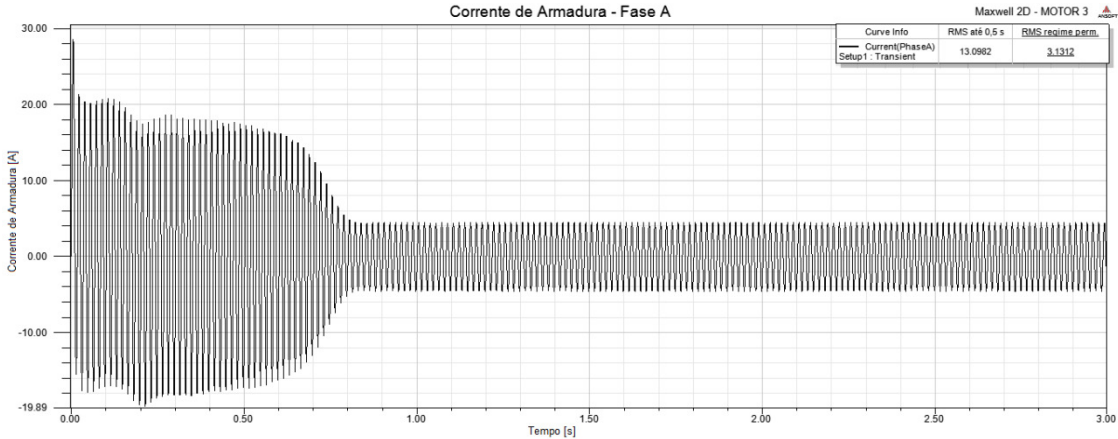


Figura 68: Corrente de armadura da fase A – Motor 3.

A distribuição de corrente e de fluxo magnético do terceiro motor no instante logo após a partida são mostrados na Figura 69.

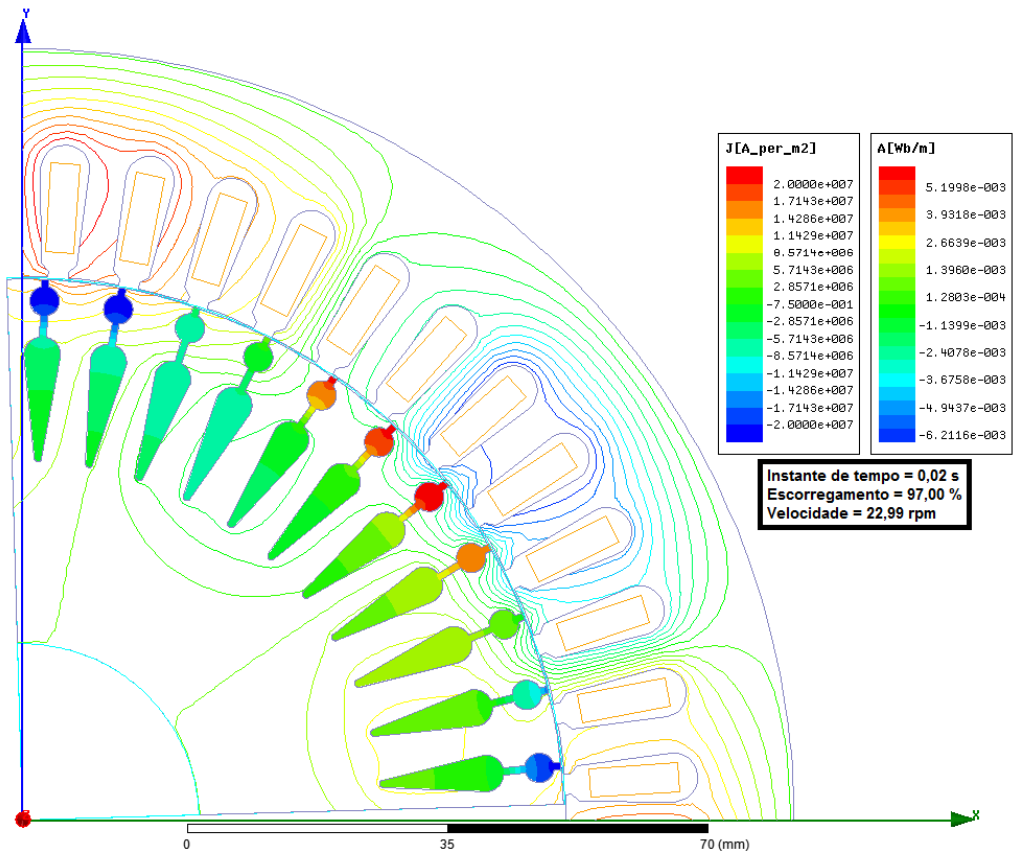


Figura 69: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento de 97,00%.

As barras duplas do rotor do terceiro motor concentram a maior parte da corrente na seção menor próxima a superfície. Com o alto escorregamento no momento da partida, 97%, as barras mais profundas ficam com uma reatância mais alta em relação às próximas à superfície, fazendo a densidade de corrente nestas ultimas ser muito maior. Diferentemente dos motores anteriores, logo na partida os polos nas barras do rotor ficam muito bem definidos.

O instante pouco anterior ao regime permanente é mostrado na Figura 70.

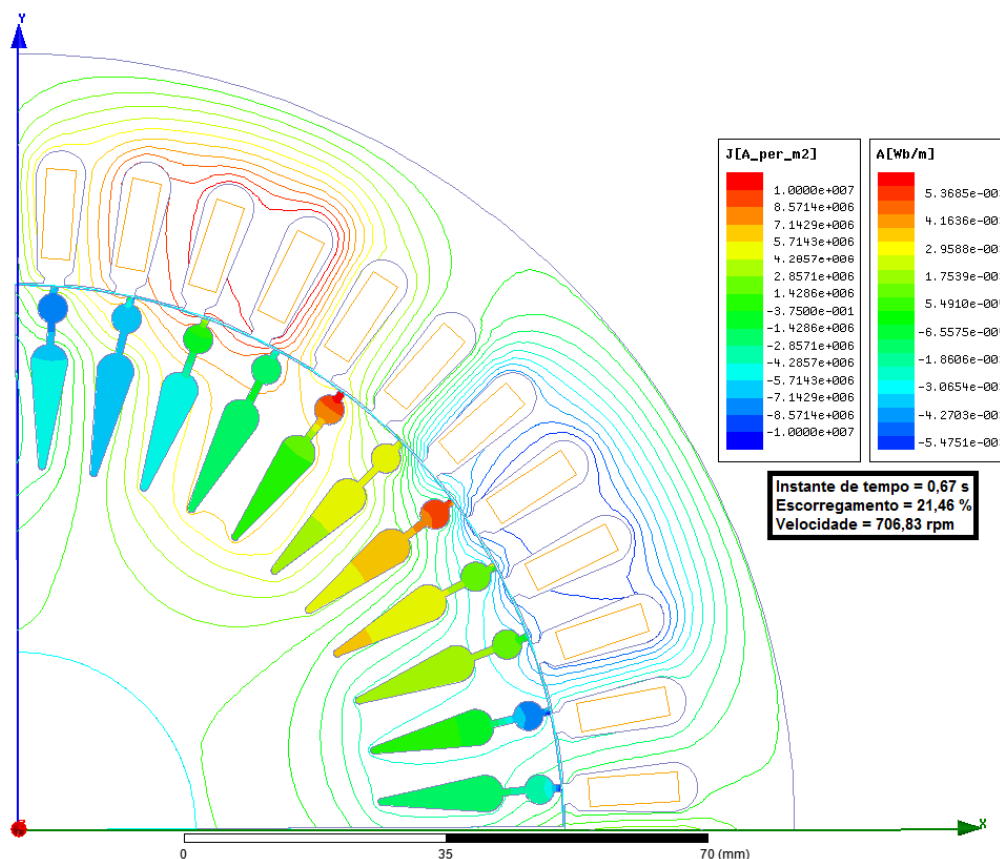


Figura 70: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento de 21,46%.

Neste instante o escorregamento já está menor e a densidade de corrente começa a aumentar nas barras profundas, porém ainda há uma concentração nas seções próximas à superfície de algumas barras. Como nos outros modelos, as linhas de campo magnético começam a se definir melhor no rotor quando o motor começa a se aproximar do regime permanente.

A Figura 71 é o último instante de tempo da simulação. É notório que com o baixo escorregamento, aproximadamente 3%, a distribuição de corrente é bastante uniforme. Isso se dá pelo fato da frequência no rotor ser muito baixa com este escorregamento, fazendo com que a reatância de dispersão ao longo da barra seja

desprezível em relação à resistência ao longo da mesma. Este comportamento está de acordo com a teoria explicada no primeiro capítulo sobre os rotores de gaiola dupla.

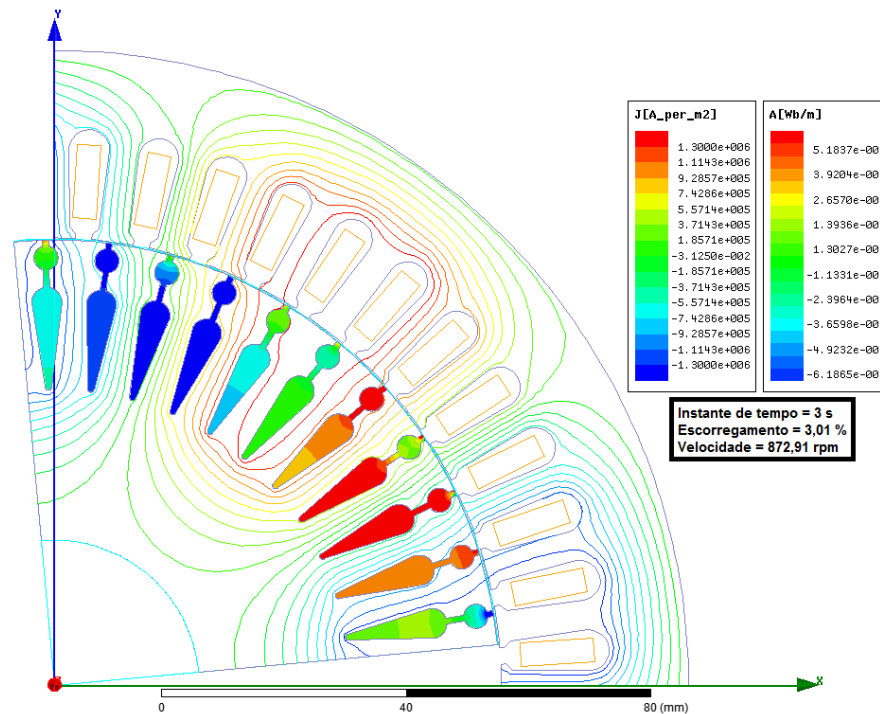


Figura 71: Distribuição de corrente nas barras do rotor com escorregamento de 3,01%.

4.2.4 - Comparação dos resultados

A fim de obter uma melhor análise a respeito das diferenças de comportamento dos modelos simulados, os gráficos “velocidade x tempo”, “conjugado x tempo” e “conjugado x velocidade” de cada uma das máquinas foram plotados juntos. O primeiro gráfico apresentado é da velocidade ao longo do tempo, mostrado na Figura 72.

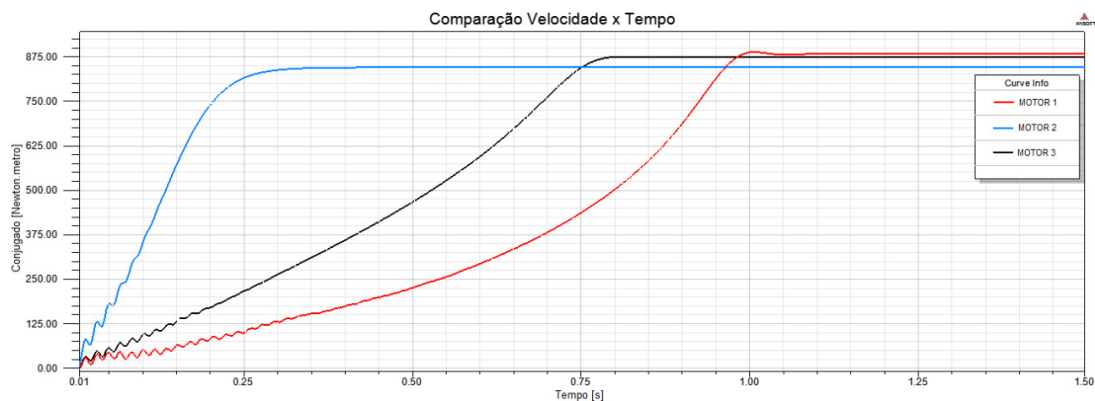


Figura 72: Velocidade x tempo dos três motores.

Neste gráfico é possível observar as características de aceleração e escorregamento dos motores. O motor 2 por ser de classe D, possui uma aceleração muito maior que os demais devido ao seu alto torque de partida. Entretanto, pode-se notar que a velocidade de regime permanente é a menor dentre os três modelos, ou seja, alto escorregamento. O primeiro motor é o que possui menor conjugado de partida em relação aos demais, porém, possui o menor escorregamento, pois sua velocidade de regime permanente foi a maior delas. O terceiro motor é o meio termo entre os modelos, com uma boa aceleração, porém com um escorregamento um pouco maior que o primeiro motor.

A comparação a seguir é do torque ao longo do tempo, mostrado na Figura 73.

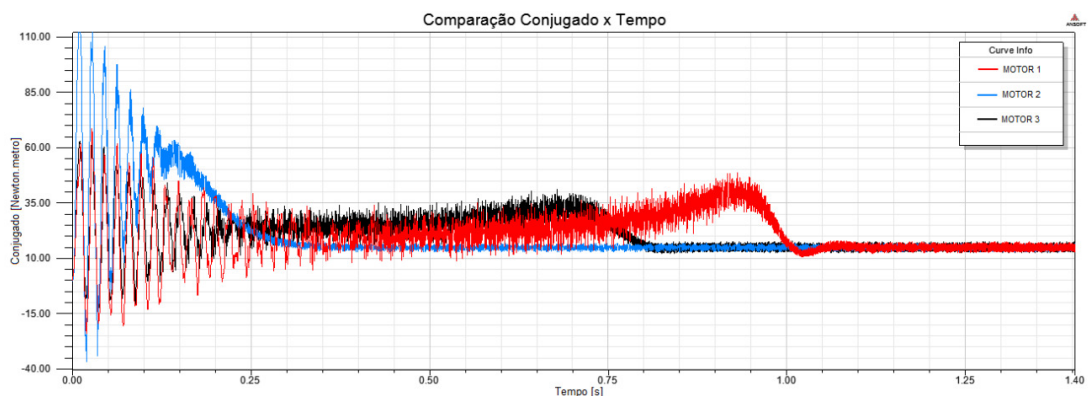


Figura 73: Conjugado x tempo dos três motores.

Esta comparação é relevante para evidenciar o quanto oscilaram na partida os motores ao longo do tempo. Nota-se que o motor de classe D, o motor 2, teve uma oscilação por muito menos tempo em relação aos demais, face ao seu alto torque de partida. Já o terceiro motor, apesar de ter oscilado por mais tempo que o segundo, estabilizou antes do primeiro. Cabe ressaltar, que o primeiro motor apresentou um torque máximo maior que o terceiro, porém, foi o que levou mais tempo para entrar em regime permanente.

Por último, a característica principal dos motores são plotadas juntas. A Figura 74 mostra o gráfico conjugado x velocidade dos três motores, conforme segue.

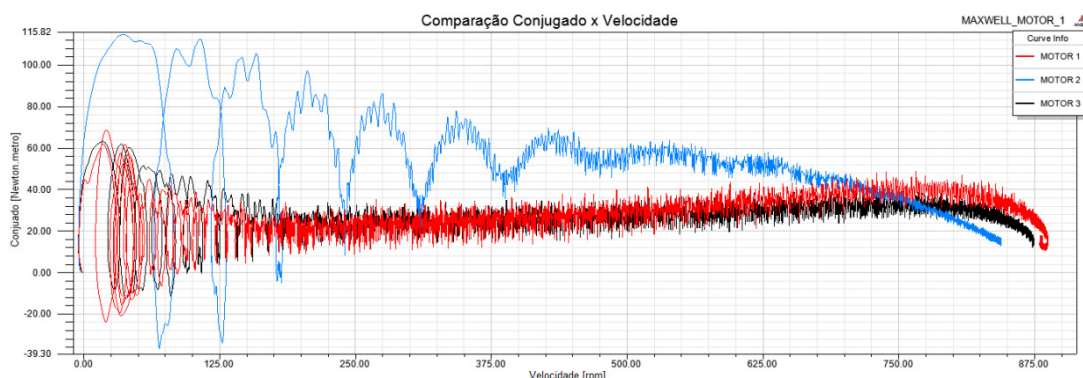


Figura 74: Conjugado x velocidade dos três motores.

Apesar das oscilações obtidas, pode-se perceber que os três motores se comportaram de forma semelhante às curvas analíticas do RMxprt. O primeiro motor teve um baixo conjugado de partida, oscilando por mais tempo que os demais, seu conjugado máximo foi maior que o terceiro motor, de classe C e seu escorregamento foi o menor dentre os três. O segundo motor apresentou o maior torque de partida, com picos de aproximadamente o dobro dos demais, entretanto apresentou o pior escorregamento, típico da classe D. O terceiro motor, mostrou conjugado de partida e escorregamento maiores e um conjugado máximo menor quando comparado ao primeiro motor.

4.2.5 - Partida estrela-triângulo

Para a simulação das partidas com tensão reduzida, foi selecionado o primeiro motor. Como a partida de tensão reduzida com chave estrela-triângulo requer uma carga inicial muito baixa ou a vazio, os parâmetros de torque de carga foram feitos usando o comando “if”, que tem a seguinte sintaxe: *if(condição , valor se verdadeiro, valor se falso)*. O comando completo no campo foi o seguinte: *if(time<1.5 , 0 , -15)*.

A expressão do comando deixa o motor a vazio, ou seja, com torque nulo, até que a variável “time” seja 1,5 s, ou seja, um segundo e meio de simulação. Após este instante ele aplica um torque de carga de 15 Newton.metro. O ideal seria usar uma expressão que relacionasse a velocidade do rotor, porém não foi possível encontrar uma expressão que funcionasse, talvez por imperícia na configuração do programa. O fato é que a variável intrínseca do programa RSpeed, que contém a velocidade do rotor, não funcionou na expressão e não foi encontrada outra que a substituísse.

Para a escolha do instante de tempo de 1,5 s, o motor foi simulado a vazio com ligação estrela e visto que ele entra em regime permanente em 1,3 s. Portanto, o instante de 1,5 s foi escolhido de forma que o conjugado de carga só fosse aplicado com o motor em regime permanente.

A simulação do chaveamento da ligação estrela-triângulo foi feita usando também a expressão com “if”. O comando completo para a fase A foi:

*if(time<1.1,(310.269/1.71)*sin(2*pi*60*time),310.269*sin(2*pi*60*time-pi/6))*

O programa não permite que seja alterada a ligação das bobinas sem usar um programa auxiliar como o Maxwell Circuit Editor ou o Simplorer. Dessa forma, para emular a mudança, a primeira expressão de tensão do comando acima é aquela que

teria na bobina no caso de uma ligação estrela, ou seja, seu valor de pico dividido por $\sqrt{3}$. Para instantes maiores que 1,1 s a tensão, a segunda expressão de tensão do comando acima, é aquela que a bobina teria para a ligação em delta, ou seja, $\sqrt{3}$ maior que a anterior e uma defasagem de 30° adiantado. Lembrando que para cada fase os comandos tiveram suas senóides adequadamente defasadas da fase A.

O total da simulação foi de 2 s. A Figura 75 mostra o conjugado, a velocidade e a corrente ao longo do tempo.

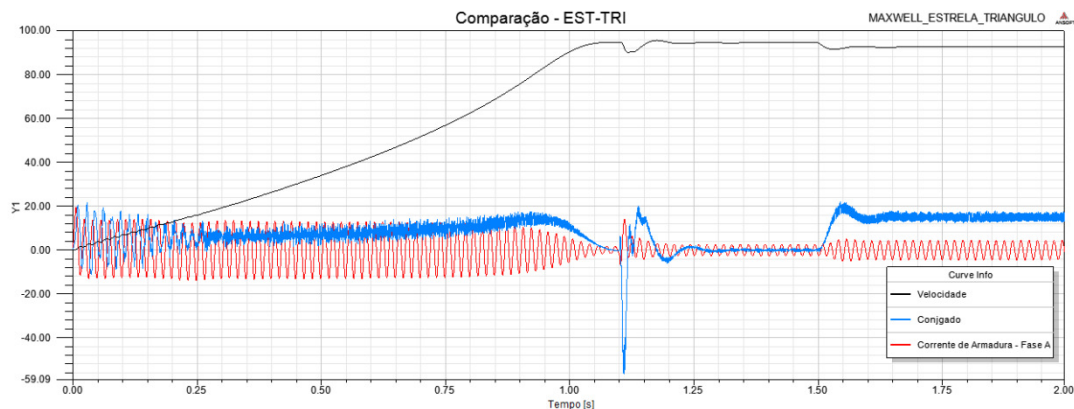


Figura 75: Conjugado, velocidade e corrente ao longo do tempo – Partida estrela-triângulo.

Com as três curvas plotadas juntas é possível observar os instantes em que há o chaveamento e o aumento de carga. O chaveamento da ligação estrela para delta ocorre em 1,1 s, e pode-se observar o pico de corrente característico desta manobra. A força contra-eletromotriz do motor gera um pico de torque negativo e também um pico de corrente. É possível notar que há uma queda de velocidade neste instante. Mais adiante, em 1,5 s, há o aumento de carga. Como era de se esperar, a velocidade cai, já que há um aumento de escorregamento. O conjugado começa a variar em torno do valor da curva, 15 Newton.metro, e a corrente também sofre um acréscimo, porém suave, sem picos.

A Figura 76 mostra o conjugado ao longo do tempo da partida direta e da partida estrela-triângulo.

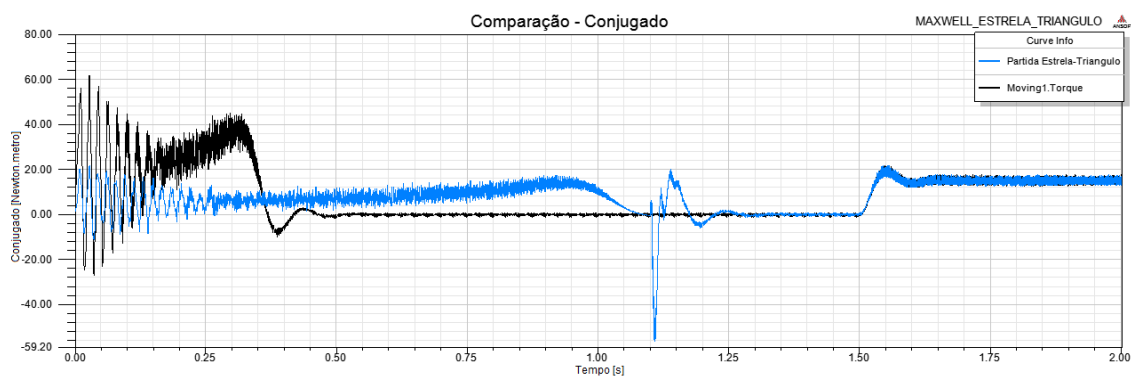


Figura 76: Comparação do conjugado entre a partida direta e a partida estrela-triângulo.

É possível notar a grande diferença entre as duas, logo na partida, nos instantes iniciais. Com a partida direta, o conjugado rapidamente se estabiliza, pois o fato de ser aplicada a tensão plena desde o início, seu valor é bem mais alto. Como esperado, o conjugado na partida estrela-triângulo é em torno de 1/3 da partida direta. Depois de 1,25 s, o motor com partida estrela-triângulo já está na ligação triângulo, ou seja, com tensão plena. É possível notar que a partir deste instante os dois motores tem o mesmo conjugado, mesmo com o aumento de carga em 1,5 s.

A Figura 77 mostra a comparação da velocidade pelo tempo das duas partidas.

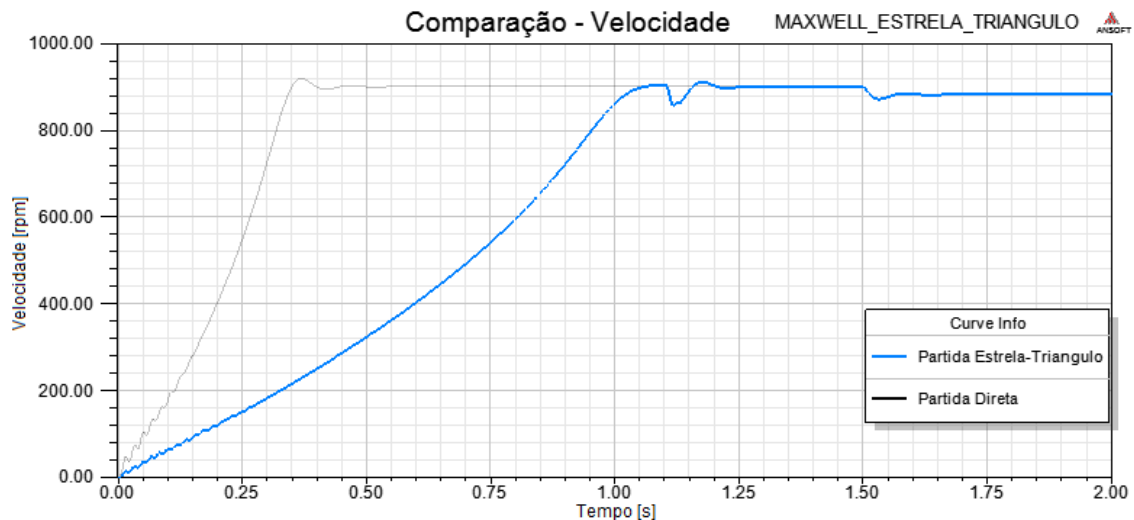


Figura 77: Comparação da velocidade entre a partida direta e a partida estrela-triângulo.

Conforme esperado, o fato do motor com partida direta ter um conjugado de partida mais elevado faz com que ele atinja o regime permanente mais rapidamente. Além disso, assim como no conjugado, após o instante 1,25 s, os dois motores tem comportamento semelhante, inclusive a queda de velocidade com o aumento de carga em 1,5 s.

A comparação mais relevante é mostrada na Figura 78, a diferença entre as correntes com partida direta e com partida estrela-triângulo.

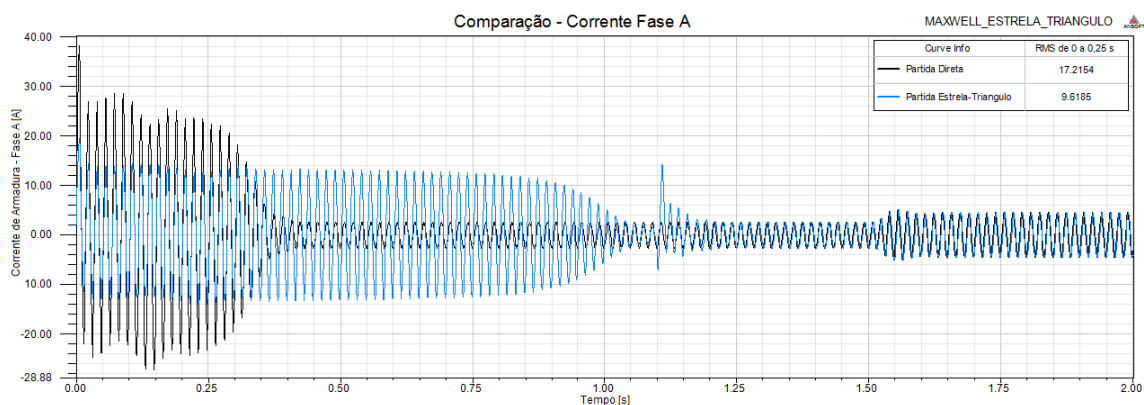


Figura 78: Comparação da corrente entre a partida direta e a partida estrela-triângulo.

Nesta figura é que se pode notar a grande vantagem da partida estrela-triângulo em relação à partida direta. A começar pelo valor eficaz nos primeiros 250 ms, antes do motor com partida direta começar a reduzir seu valor. Enquanto a partida com chave estrela-triângulo teve uma corrente de partida com valor eficaz de 9,62 A, a partida direta teve uma corrente com valor eficaz de 17,21 A. O pico de corrente com o chaveamento de estrela para triângulo alcança um valor de aproximadamente 14 A e, após este instante, passa a ter os mesmos valores que o motor com partida direta.

4.2.6 - Partida com autotransformador

A partida com autotransformador permite que a carga inicial seja maior que da partida anterior. Entretanto, para comparar as partidas, as configurações de carga foram mantidas, ou seja, nula até 1,5 se 15 Newton.metro após este instante.

Nesta simulação não houve como emular com o comando “if” a abertura da ligação estrela do primário do autotrafo. Dessa forma, esta etapa não foi considerada, como se a abertura da ligação e o bypass do autotrafo ocorresse instantaneamente.

O tap considerado para esta simulação foi de 65%. Dessa forma, o comando completo para a fase A foi:

$$if(time < 1.1, 310.269 * 0.65 * \sin(2 * \pi * 60 * time), 310.269 * \sin(2 * \pi * 60 * time))$$

Conforme feito na partida anterior, a Figura 79 mostra as três curvas conjugado, velocidade e corrente da fase A ao longo do tempo juntas.

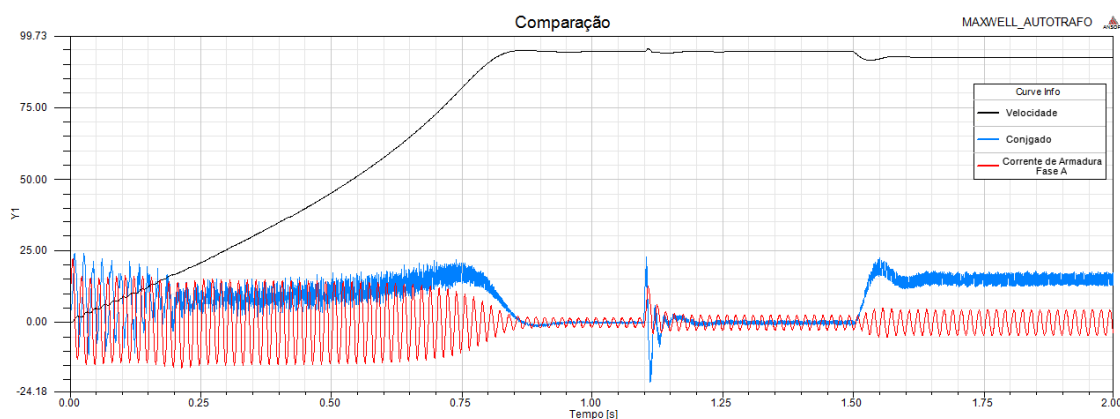


Figura 79: Conjugado, velocidade e corrente ao longo do tempo – Partida com autotrafo.

Da mesma maneira que na partida anterior, é possível ver os instantes em que há transição. O pico de corrente e torque com o bypass do autotransformador causaram uma pequena perturbação, quase imperceptível, na velocidade. No instante

1,5 s é possível ver o aumento de carga, com a queda da velocidade, aumento da corrente e do conjugado do motor.

A Figura 80 mostra a comparação do conjugado da partida direta com a partida com autotrafo.

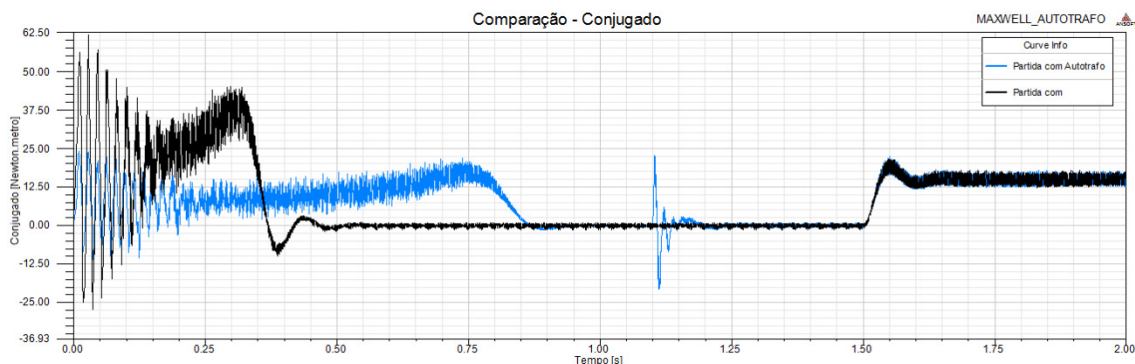


Figura 80: Comparação do conjugado entre a partida direta e a partida com autotrafo.

Como a simulação considerou um tap de 65%, o conjugado esperado do motor com partida com autotrafo era em torno dos 42,25% menor que o motor com partida direta. Portanto, o resultado coincidiu com o esperado, já que nos primeiros 150 ms os picos do motor com partida com autotrafo está um pouco abaixo da metade dos picos do motor com partida direta. Além disso, assim como no caso anterior, o motor com partida direta atinge o regime permanente mais rapidamente que o outro motor.

A comparação da velocidade ao longo do tempo entre a partida direta e com autotrafo é mostrada na Figura 81.

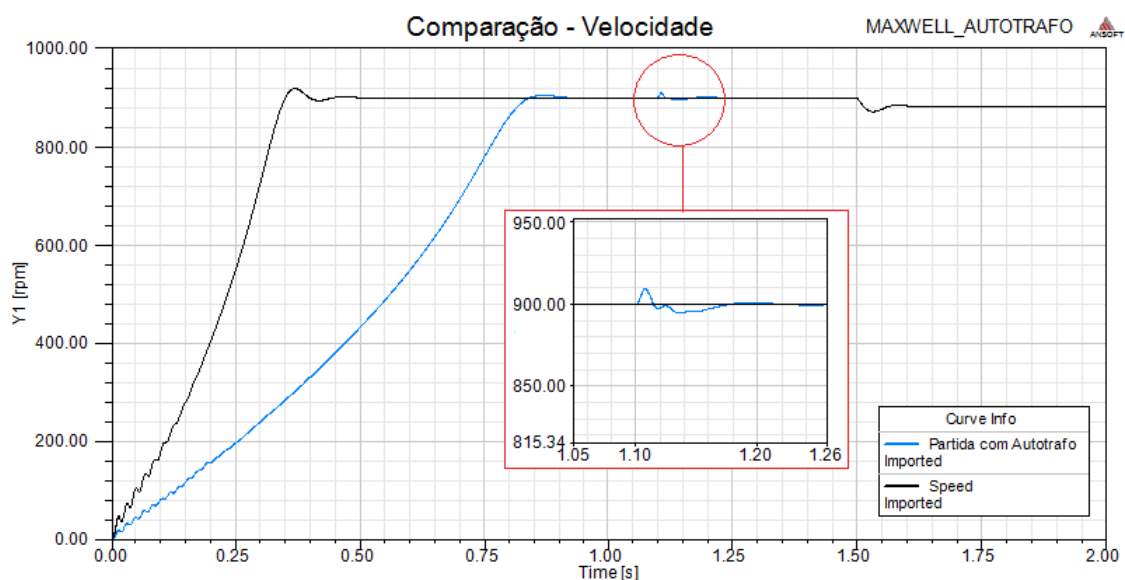


Figura 81: Comparação da velocidade entre a partida direta e a partida com autotrafo.

Conforme esperado, com conjugado reduzido, o motor com partida com autotrafo leva mais tempo para atingir o regime permanente. Pode-se observar o quão pequena é a perturbação na velocidade devido ao bypass do autotrafo.

A corrente de armadura da fase A da partida direta e da partida com autotrafo são mostradas na Figura 82.

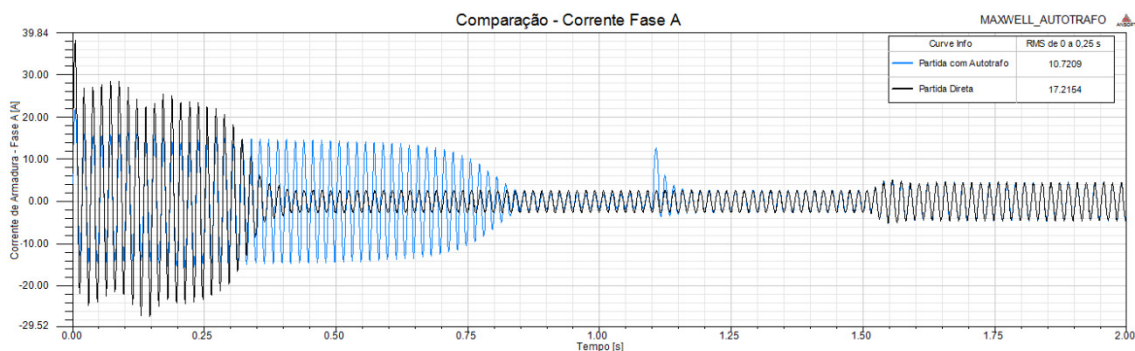


Figura 82: Comparação da corrente entre a partida direta e a partida com autotrafo.

Mais uma vez, é possível observar a redução de corrente de partida. A partida com o autotrafo apresentou valor eficaz de 10,72 A enquanto a partida direta os mesmos 17,21 A mostrados anteriormente. O pico de corrente devido ao curto-circuito do autotransformador foi de aproximadamente 12 A.

4.2.7 - Comparação entre as duas partidas

Para avaliar melhor a diferença entre as duas partidas os seus resultados foram postos juntos. A Figura 83 mostra o conjugado das duas partidas.

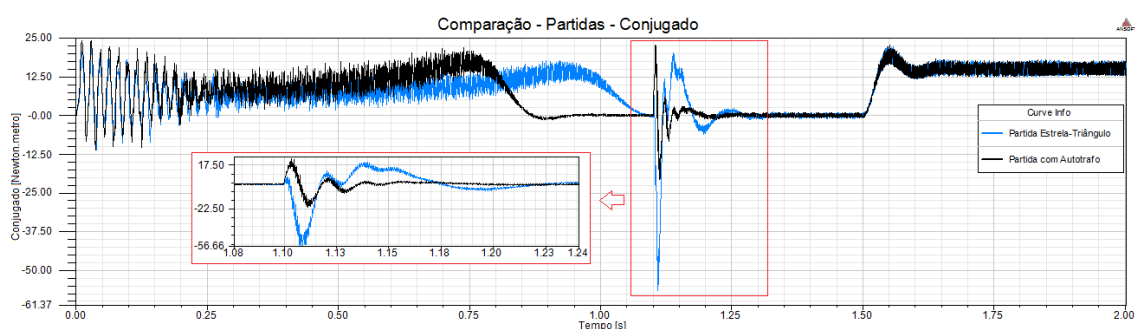


Figura 83: Comparação dos conjugados das partidas.

Conforme esperado, o conjugado de partida com autotransformador é maior, já que a tensão com que o motor é alimentado também é maior desde o início. Portanto, o motor com conjugado maior se estabiliza mais rápido. Além disso, o motor com partida estrela-triângulo apresentou uma oscilação mais severa no momento do

chaveamento, o que era de se esperar. Apesar de não ter havido interrupção de corrente, o que aproximaria a simulação ainda mais de um chaveamento real, neste instante há uma troca de alimentação para uma tensão com senóide adiantada de 30° e com amplitude maior. Como na partida do autotrafo não há essa mudança na fase da senóide, mas apenas da amplitude, a oscilação do torque é mais suave.

A Figura 84 mostra a diferença da velocidade ao longo do tempo para as duas partidas.

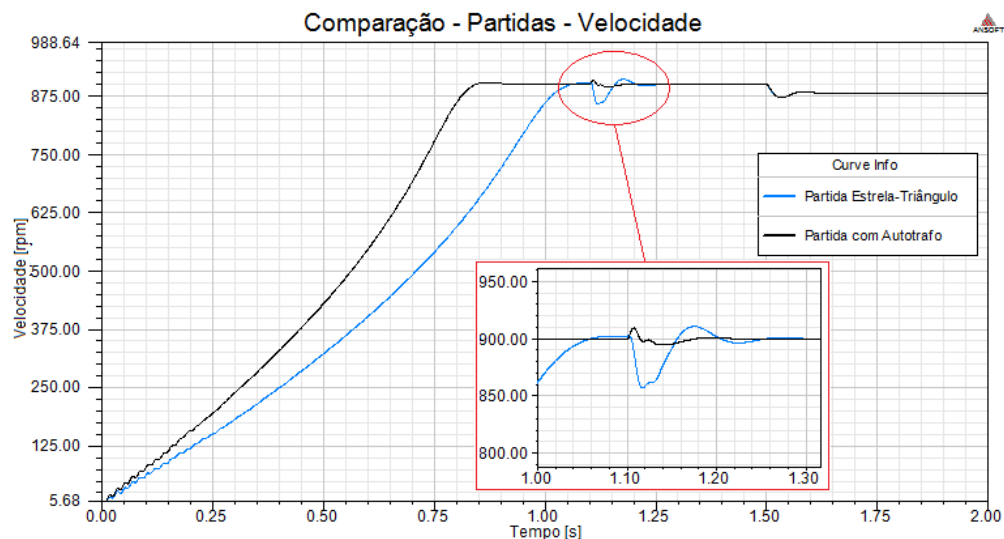


Figura 84: Comparação das velocidades das partidas.

Como esperado, o conjugado maior da partida com autotrafo, proveu uma aceleração maior ao motor, fazendo-o atingir o regime permanente mais rapidamente que o motor com partida estrela-triângulo. Além disso, nota-se a diferença de perturbação na velocidade no instante do chaveamento, muito menor no motor com partida com autotrafo.

As correntes de armadura são comparadas na Figura 85.

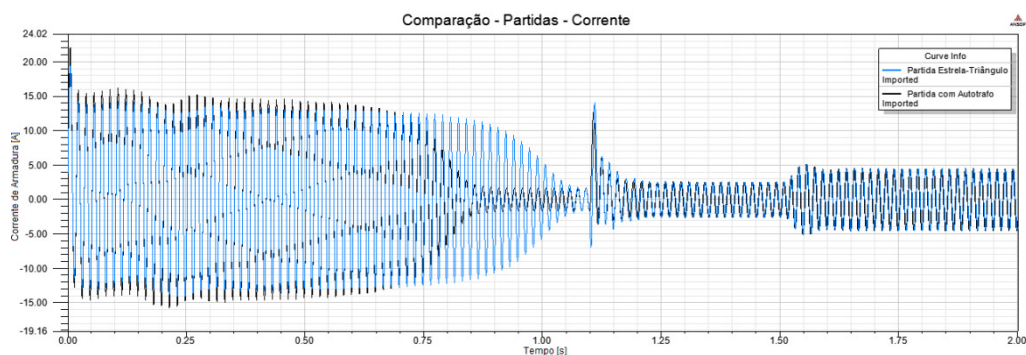


Figura 85: Comparação das correntes das partidas.

É possível notar que a corrente de partida com a chave estrela-triângulo é menor, o que já era esperado, já que a tensão de alimentação inicialmente também é

menor. Pode-se observar que a partida com o autotrafo tem um decaimento maior da corrente de armadura em virtude do conjugado maior, que faz o motor atingir o regime permanente mais rápido. Quanto ao pico de corrente no momento do chaveamento, a diferença foi de aproximadamente 15%, sendo 12 A na partida com autotrafo e 14 A na partida com chave estrela-triângulo.

Capítulo 5 - Conclusão

O presente trabalho objetivou mostrar as diferentes partidas que se pode obter com a alteração da ranhura do rotor de um motor de indução trifásico e com as técnicas de tensão reduzida de partida. Para tal, foi descrita uma breve introdução teórica, a fim de apresentar respaldo dos resultados nos principais fenômenos físicos que ocorrem no funcionamento dos motores de indução, como campo girante, escorregamento, concentração de corrente nas barras, entre outros. Além disso, fórmulas foram apresentadas e analisadas com base no circuito equivalente de regime permanente do motor de indução. A introdução teórica foi finalizada com a apresentação dos dois tipos de partida com tensão reduzida que foram simuladas.

As diferentes geometrias das ranhuras do rotor fornecem ao motor de indução uma grande versatilidade, permitindo que seja empregado em diversas atividades. Foi visto como uma simples alteração nas ranhuras é capaz de duplicar o conjugado de um motor, aumentar ou diminuir seu escorregamento e, ainda, melhorar sua corrente de partida. Foi visto, ainda, como as partidas com tensão reduzida contribuem para reduzir a corrente de partida de um motor de indução trifásico.

Os resultados obtidos nas simulações pelos softwares da Ansoft foram consideravelmente satisfatórios. As análises realizadas pelo RMxprrt corresponderam aos comportamentos previamente explanados no primeiro capítulo. Quanto ao conjugado de partida, os comportamentos corresponderam às características das classes vistas no capítulo 1. Quanto à corrente de partida, embora se esperasse um valor um pouco mais baixo para o segundo motor, a baixa corrente do terceiro motor correspondeu à expectativa típica da classe C. Quanto à característica conjugado x velocidade e o escorregamento, eles se mostraram muito semelhante às classes para todos os motores.

Os resultados de distribuição de corrente nas barras do rotor, calculado pelo Maxwell 2D, usando o método dos elementos finitos, também se apresentou, em grande parte, condizente com o teórico. O comportamento ocorreu de forma idêntica ao explicado na introdução teórica, respeitando os instantes em que a densidade deveria aumentar em certos pontos de acordo com a geometria de cada um dos motores. Em especial, o terceiro motor foi o que mais se observou a concentração de corrente de forma bem evidente e clara. Por outro lado, para a corrente de partida do segundo motor, assim como no RMxprrt, se esperava um valor mais baixo. O conjugado de partida do terceiro motor foi muito parecido com o primeiro, porém,

esperava-se um valor um pouco maior, assim como no RMxp_rt. Entretanto, a diferença de conjugado máximo do primeiro para o terceiro correspondeu ao teórico.

As linhas de fluxo magnético foram apresentadas no resultado como informação adicional para entender o porquê das concentrações de corrente positivas ou negativas nas barras. Adicionando as linhas de fluxo aos resultados, foi possível observar o fenômeno interessante de reação do campo gerado pelas correntes no rotor em oposição ao campo do estator. Observou-se que esta reação diminuiu em instantes diferentes nos três modelos simulados, devido ao fato dos motores terem alcançado o regime permanente em tempos diferentes. Como já foi dito, em regime permanente a corrente do rotor diminui, e a reação ao campo do estator também, fazendo com que as linhas de fluxo magnético do estator prevaleçam, evidenciando os polos gerados pelo mesmo.

Com as simulações das partidas com tensão reduzida, foi possível compreender como obter uma corrente menor na partida do motor, de forma a comprometer menos o sistema de alimentação. Além disso, foi possível comparar as duas técnicas de partidas com a partida direta e posteriormente entre si.

Os resultados foram bastante satisfatórios, visto que a redução no torque de partida se preservou numa proporção aproximada ao esperado, que era 1/3 para a partida com chave estrela-triângulo e 42,25% para a partida com autotrafo, quando comparados à partida direta. Dessa forma, pode-se concluir que os comandos usados para emular os chaveamentos funcionaram de forma satisfatória.

Como proposta para trabalhos futuros, pode-se citar a utilização dos modelos no software Simplorer, também da Ansoft. Este software permite uma simulação concomitante com o modelo do Maxwell 2D ou 3D, porém, aplicado em circuitos externos. Dessa forma, as partidas aqui simuladas poderão ser feitas sem que a etapa da abertura da ligação Y seja desprezada, fornecendo assim, resultados ainda mais próximos do real. Além disso, outros tipos de partidas, citados no presente trabalho, poderão ser simulados e comparados.

Referências Bibliográficas

- [1] FITZGERALD, A. E., JR, CHARLES KINGSKEY e UMANS, STEPHEN D., [trad.] Anatólio Laschuk., 2006, **Máquinas Elétricas**. 6ª ed. Porto Alegre, Bookman.
- [2]SADIKU, MATTHEW N. O., [trad.] Jorge Amoretti Lisboa e Liane Ludwig Loder., 2004, **Elementos de Eletromagnetismo**. 3ª ed. Porto Alegre, Bookman.
- [3] Marques, Gil Domingos.,2001, **Apostila - Cap. 3 - Máquinas de Indução Polifásicas**. Disponível em: <www.lea.ufpa.br/alex/arq/SEII_cap3.pdf>. Acesso em: 10 set. 2012.
- [4] Ansoft, 2010, **Maxwell 2D- User Manual**.
- [5] CHAPMAN, STEPHEN J., 2005, **Eletric Machiney Fundamentals**. 4ª ed. New York : 4Mc-Graw Hill.